BRUNO MARTINOLI

ISOLATORI DI PORCELLANA

GENERALITÀ E CARATTERISTICHE DEGLI ISOLATORI - ISOLATORI PER ALTA TENSIONE - COLLAUDO DEGLI ISOLATORI

Con 146 figure e 16 tabelle



EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

Dott. Ing. BRUNO MARTINOLI

ISOLATORI DI PORCELLANA

GENERALITÀ E CARATTERISTICHE DEGLI ISOLATORI - ISOLATORI PER ALTA TENSIONE - COLLAUDO DEGLI ISOLATORI

Con 146 figure e 16 tabelle



EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO
1947

PREFAZIONE

Gli isolatori, che hanno una parte principalissima per ciò che concerne la trasmissione e l'utilizzazione dell'energia elettrica, sono sempre stati trascurati o quasi dalla letteratura tecnica, nel senso che se sono state fatte pubblicazioni sulle riviste tecniche, ed in Italia purtroppo molto poco anche in questo senso, esse si riferiscono a questo od a quel tipo particolare di isolatore, ma non si è mai trattato l'argomento degli isolatori in forma organica, in modo da presentare chiaramente le loro caratteristiche, il loro modo di comportarsi nelle varie applicazioni e la loro struttura sia nei riguardi del loro comportamento meccanico che elettrico.

Ciò ha sempre ostacolato la diffusione della conoscenza degli isolatori per cui questa è sempre venuta ad essere il privilegio di pochi iniziati che hanno dovuto farsi un corredo tecnico nel ramo in base alla propria esperienza dovuta alla fatica quotidiana.

Accingendomi alla compilazione di questo modesto lavoro ho avuto per scopo la diffusione della conoscenza degli isolatori ed in special modo quelli di porcellana, materiale che si è andato sempre più affermando per le sue ottime qualità sia elettriche che meccaniche.

Ho trattato l'argomento in forma piana, senza ricorrere per quanto possibile a formule, in modo da essere specialmente chiaro. Se qualcuno potrà giovarsene mi riterrò lieto del lavoro compiuto.

Chiedo che mi si perdonino le immancabili imperfezioni e voglio sperare che altri più valenti di me prendano lo spunto e lo stimolo per la compilazione di un'opera più completa ed organica, cosicchè anche questo ramo importante della tecnica possa avere la diffusione che merita.

Ing. BRUNO MARTINOLI

INDICE

PARTE PRIMA

GENERALITÀ E CARATTERISTICHE DEGLI ISOLATORI

PARTE SECONDA

ISOLATORI PER ALTA TENSIONE

PARTE TERZA

COLLAUDO DEGLI ISOLATORI

INDICE DELLE TABELLE

PARTE PRIMA

GENERALITÀ E CARATTERISTICHE DEGLI ISOLATORI

CAPITOLO I

CORPI CONDUTTORI E CORPI ISOLANTI

La corrente elettrica è data da movimento di cariche elettriche.

In natura esistono due specie di cariche elettriche di diverso tipo e cioè le cariche elettriche positive (+) e le cariche elettriche negative (—).

La materia è costituita da atomi; l'atomo può essere considerato

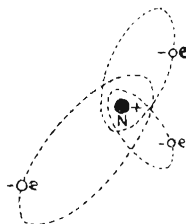


Fig. 1.

come un sistema solare in miniatura, con una parte centrale (nucleo) caricato positivamente, che costituisce il centro attrattivo e con diverse particelle caricate negativamente (elettroni) che ruotano con velocità vertiginosa attorno al nucleo seguendo delle orbite ellittiche (figura 1).

La forza che tiene vincolati gli elettroni alla compagine atomica

impedendo loro di allontanarsi indefinitamente dal nucleo è la forza di attrazione elettrica tra nucleo ed elettroni che si manifesta tra le cariche di segno opposto di cui essi sono caricati.

L'insieme dell'atomo (nucleo + elettroni) non sottoposto ad azioni elettriche è, in condizioni ordinarie, elettricamente neutro, poichè il nucleo porta una carica positiva uguale e contraria a quella complessiva degli elettroni. Quando entrano in giuoco particolari condizioni come ad esempio nella scarica attraverso i gas, nelle soluzioni elettrolitiche ecc., l'atomo non si comporta più come elettricamente neutro ma si creano in esso degli sbilanci tra le cariche elettriche negative e quelle positive e si può avere un eccesso delle prime rispetto alle seconde o viceversa, quindi l'atomo può risultare carico o positivamente o negativamente.

Questo fenomeno prende il nome di ionizzazione. Nel caso che gli elettroni abbandonino l'atomo lasciandolo caricato positivamente esso prende il nome di *ione positivo,* invece quando si manifestano quelle particolari condizioni in cui intorno al nucleo vengano a legarsi più o meno stabilmente delle cariche negative in eccesso l'atomo prende il nome di *ione negativo.*

Gli elettroni, che in taluni corpi non sono legati stabilmente al nucleo, sotto l'azione di determinate forze possono venir strappati dall'atomo e convogliati nel conduttore a formare la corrente elettrica.

Tutti i corpi oppongono al movimento delle cariche elettriche un certo ostacolo cui si dà il nome di resistenza elettrica. I corpi che non ostacolano sensibilmente il passaggio delle cariche elettriche prendono il nome di *conduttori,* quelli in cui la corrente elettrica incontra un grande ostacolo al suo passaggio prendono il nome di *isolanti* o *dielettrici.*

La distinzione tra corpi conduttori e corpi isolanti è quanto mai relativa poichè si passa con continuità dagli uni agli altri, quindi si dovrebbe più propriamente parlare di buoni conduttori e di cattivi conduttori.

I conduttori ideali sarebbero quelli in cui la resistenza al passaggio della corrente fosse nulla e gli isolanti perfetti quelli in cui

detta resistenza fosse infinita, ma sia gli uni che gli altri sono pure astrazioni.

Buoni conduttori sono i metalli (rame, argento, ferro, ecc.); tra gli isolanti hanno importanza la carta, il vetro, la porcellana, la mica, la bachelite, ecc.

Classificazione degli isolanti.

Vario è il comportamento dei diversi isolanti al variare delle condizioni chimico-fisiche in cui essi vengono a trovarsi e non tutti rispondono ai diversi requisiti d'impiego per cui gli isolanti vengono adottati; da ciò una scelta accurata in base alle loro caratteristiche, per lo scopo a cui devono servire. Così mentre in alcuni casi si richiede loro solo un buon comportamento al carico elettrico, in altri devono venir sottoposti a carico combinato elettro-meccanico e così pure nei riguardi della frequenza, mentre alcuni servono ottimamente per basse frequenze e non per frequenze elevate, altri rispondono bene anche alle alte ed altissime frequenze.

Praticamente si possono dividere gli isolanti in tre categorie:

1) Sostanze di natura porosa.

2) Sostanze meno porose ma igroscopiche (carta e fibre impregnate).

3) Sostanze impermeabili (caucciù, resine sintetiche, porcellana, ecc.).

I materiali ceramici appartengono al primo gruppo se porosi, al terzo se vetrificati.

I prodotti ceramici per uso elettrotecnico possono essere divisi nei seguenti gruppi:

1) Porcellana dura e compatta con preponderanza di caolino per isolatori a bassa ed alta tensione.

2) Prodotti fabbricati con preponderanza di silicati di magnesio, a piccolo angolo di perdita, per alte frequenze.

3) Prodotti contenenti titanio, a basse perdite e costante dielettrica elevata, per condensatori.

4) Prodotti fabbricati con preponderanza di caolino e di talco, ad elevata resistenza termica, per candele di motori, ecc.

5) Prodotti porosi a basso potere isolante e a bassa conducibilità termica, per apparecchi di riscaldamento.

Al primo gruppo appartiene la porcellana dura per isolatori ad alta e bassa tensione per frequenza industriale, con composizione silico-alluminosa-alcalina.

Al secondo gruppo appartengono le steatiti a composizione chimica magnesiaca, per isolatori per alta e bassa tensione per alta frequenza, che prendono nomi diversi a seconda della composizione e della provenienza (calan, calit, frequenta, ecc.).

Al terzo gruppo appartengono gli impasti a forte tenore di titanio che prendono i vari nomi di condensa, condensa C, kerafar, ecc., e servono per la costruzione di condensatori.

Al quarto gruppo appartengono le cordieriti-steatiti con composizione chimica silico-alluminosa-magnesiaca, che prendono il nome di ardostan, sipa, ecc., e servono per prodotti resistenti alle alte temperature ed alle rapide variazioni termiche.

Al quinto gruppo appartengono le steatiti porose con composizione chimica silico-alluminosa-magnesiaca, che hanno un'ottima resistenza termica e che non possono quasi essere considerati isolanti elettrici e che vengono impiegati come supporti per apparecchi termoelettrici.

Da quanto sopra accennato si vede che ogni isolante ha delle caratteristiche sue proprie che bisogna tener presenti per il miglior impiego di un materiale o dell'altro.

Caratteristiche degli isolanti.

Le caratteristiche principali degli isolanti sono:

Resistività di massa. — È la resistenza che oppone un corpo al passaggio della corrente elettrica. Dipende dall'intima struttura del materiale e diminuisce fortemente con l'aumentare della temperatura.

La resistività di massa segue la legge di Ohm ed è espressa in megaOhm. cm.

COSTANTE DIELETTRICA RELATIVA (AL VUOTO). — È un numero puro dato dal rapporto

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

ε_r = costante dielettrica relativa
ε = » » assoluta misurata in farad/metro
ε_0 = » » del vuoto » » » »

Per passare dalla costante dielettrica relativa a quella assoluta (permettività) basta moltiplicare per $8{,}86 \cdot 10^{-12}$ farad/metro.

RIGIDITÀ DIELETTRICA. — È la tensione capace di perforare il dielettrico. È espressa in kV/mm (valori efficaci).

Non aumenta proporzionalmente allo spessore del dielettrico, ma in maniera molto minore, poichè questo fenomeno è influenzato moltissimo da molti fattori (temperatura, gas inclusi, ecc.)

La rigidità dielettrica aumenta inoltre col ridursi della frequenza e con la durata e la modalità di applicazione della tensione.

Per passare dalla tensione efficace alla tensione massima basta moltiplicare per $\sqrt{2}$.

RESISTIVITÀ SUPERFICIALE. — È la resistenza che incontra la corrente elettrica a percorrere la superficie di un corpo isolante. È espressa in megaohm.

Essa è definita dalla relazione

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{L_1}{L_2}$$

dove R_s è la resistività di un elemento rettangolare di superficie lungo L_1 e largo L_2.

La resistività superficiale è indipendente dalla natura del materiale, ma varia fortemente con lo stato della superficie (pulita o sporca) e diminuisce al crescere dell'umidità dell'ambiente.

Nella tabella seguente sono riportati i valori delle principali caratteristiche dei corpi isolanti, per gli isolanti più noti ed usati.

TABELLA I.

Principali caratteristiche elettriche dei corpi isolanti.

Materiale	Resistività di massa in m $\Omega \cdot$ cm ϱ	Costante dielettrica relativa ε_r	Rigidità dielettrica KV/cm (val. efficace)	Resistività superficiale ϱ_s in m Ω	
				con umidità 50 %	con umidità 90 %
Bachelite stamp.	$5 \cdot 10^4$	$2 \div 6$	$100 \div 200$	10^6	—
Carta secca . . .	$10^3 \div 10^6$	$1,6 \div 2,6$	$60 \div 110$	—	—
Carta bachelizzata	$10^5 \div 10^7$	5	$50 \div 150$	$10^3 \div 10^5$	—
Carta paraffinata	10^{10}	$2,5 \div 4$	$400 \div 500$	—	—
Celluloide . . .	$2 \cdot 10^4$	$2 \div 7$	$100 \div 300$	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$
Gomma elastica .	$10^8 \div 10^{10}$	$2,3 \div 2,7$	—	—	—
Legno paraffinato	$5 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^7$	$2,5 \div 7,7$	$80 \div 300$	$4 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^2$
Mica	$4 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^{11}$	$5 \div 6$	$600 \div 1800$	$2 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^3$
Paraffina solida .	$3 \cdot 10^{10} \div 5 \cdot 10^2$	$2 \div 2,5$	$140 \div 450$	$9 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^5$
Porcellana . . .	$4 \cdot 10^5 \div 4 \cdot 10^9$	$4,5 \div 6,5$	$200 \div 400$	—	$(2 \div 4) \cdot 10^2$
Presspan	$5 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^6$	$2,5 \div 5$	$70 \div 130$	—	—
Vetro	$2 \cdot 10^7 \div 8 \cdot 10^9$	$4,5 \div 10$	$100 \div 400$	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10$

Esaminando i valori riportati nella tabella per i vari materiali vediamo che dal punto di vista considerato i migliori isolanti sono la mica, la porcellana ed il vetro.

Perdite negli isolanti.

Lo scopo degli isolanti è quello di impedire il passaggio di corrente sia attraverso la loro massa, sia lungo la loro superficie. La resistenza superficiale dipende dalla forma e dalla natura della superficie ed è influenzata moltissimo dalle condizioni ambientali in cui lavora l'isolatore.

Le perdite attraverso la massa possono essere:

1) perdite di dissipazione causate dalla conduttività vera e propria, che seguono la legge di Ohm.

2) perdite dielettriche propriamente dette, generate da un campo elettrico variabile che sono espresse dalla formula:

$$N = V^2 \, 2 \pi f C \operatorname{tg} \delta$$

dove:

V = tensione;
f = frequenza;
C = capacità;
$tg\delta$ = angolo di perdita.

Come si vede dalla formula le perdite dielettriche aumentano con l'aumentare della frequenza e con la variazione delle caratteristiche proprie del materiale, cioè la capacità e l'angolo di perdita.

Angolo di perdita.

Un'altra caratteristica degli isolanti è il variare del loro angolo di perdita col variare della frequenza della corrente applicata. Così, come abbiamo già accennato, mentre vi sono isolanti che si comportano bene tanto con basse come con alte frequenze, altri invece con l'aumentare della frequenza aumentano grandemente il loro angolo di perdita, quindi mentre sono atti allo scopo nel primo caso non lo sono più nel secondo.

La tabella seguente mostra la variazione dell'angolo di perdita con l'aumentare della frequenza.

TABELLA II.
Variazioni dell'angolo di perdita con la frequenza.

Materiale	Angolo di perdita (in 10^{-4} rad)				
	f = 300 KHz	f = 1000 KHz	f = 3000 KHz	f = 10000 KHz	f = 50000 KHz
Quarzo	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Mica	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Vetro di quarzo	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7
Condensa	9,7	8,0	7,2	6,1	5,7
Condensa C	7,2	6,0	4,1	3,2	2,8
Kerafar	20,0	15,0	—	12,0	—
Calan	3,6	3,2	2,8	2,6	2,5
Calit	4,1	3,8	3,7	3,4	3,2
Frequenta	2,0	2,8	3,0	3,8	5,0
Steatite	21,0	20,0	18,0	17,0	15,0
Porcellana	70,0	55,0	49,0	63,0	85,0
Bachelite	100,0	160,0	200,0	220,0	260,0

Come si vede dalla tabella la porcellana è meno adatta di altri isolanti per le alte frequenze.

Diminuzione del potere isolante con l'aumento della temperatura.

Con l'aumento della temperatura gli isolanti perdono il loro potere per il fatto che le particelle del materiale dilatandosi lasciano dei vuoti permettendo così la ionizzazione, perciò il materiale diventa conduttore.

La diminuzione del potere isolante col crescere della temperatura varia secondo Raasch Hinrisese con una legge che dice che il logaritmo della resistenza R è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta.

$$\log R = \frac{A}{T} + B$$

dove A e B sono costanti dipendenti dalla natura del materiale.

Krachenbehl e Parmelee danno i seguenti valori per le misure delle caratteristiche elettriche della porcellana in funzione della temperatura:

TABELLA III

Variazione della costante dielettrica e della conducibilità elettrica della porcellana in funzione della temperatura.

Temperatura °C	Costante dielettrica ε_r	Conducibilità elettrica Ω^{-1}/cm
0	8	0,15
10	8,15	0,2
20	9	0,3
30	11	0,6
40	14	1,5
50	17	3,7
60	22,5	10,2
70	30	20,5

Alle alte temperature la porcellana diventa un buon conduttore.

Le massime temperature di lavoro per gli isolanti sotto riportati sono:

Porcellana	100	°C
Mica	500	»
Amianto	550	»

La porcellana comune ha un limite d'impiego ristretto riguardo agli sbalzi di temperatura, ma questo è più che sufficiente per gli usi comuni; per usi speciali per impiego ad alte temperature o per la resistenza a forti sbalzi di temperatura è possibile fabbricare porcellane speciali, contenenti in sostituzione del feldspato, berillio o zirconio o minerali di litio o sillimanite artificiale.

Dal punto di vista meccanico ed elettromeccanico essa ha un ottimo comportamento, come vedremo più avanti parlando di questo materiale.

Da quanto precede risalta il perchè del largo ed incontrastato impiego degli isolatori di porcellana, specialmente per linee per bassa, media ed alta tensione a frequenza industriale.

Come isolanti per alte frequenze servono molto bene i prodotti ceramici a base di silicati di magnesio, come abbiamo accennato, ed è notevole lo sviluppo che sta prendendo l'uso delle alte frequenze per cui anche questa branca dell'industria ceramica si è molto sviluppata.

Nelle tabelle seguenti riportiamo i valori delle principali proprietà dei materiali ceramici per uso elettrotecnico.

Isolanti in serie ed in parallelo.

È interessante studiare il comportamento di due isolanti diversi posti nello stesso campo elettrico, ciò che capita spesso nella pratica, e si vede allora come le sollecitazioni che essi sopportano possono essere molto diverse.

Un campo elettrico è caratterizzato dalle sue linee di forza che partono da un elettrodo per raggiungere l'altro; queste linee di fòrza sono ininterrotte, ma subiscono una rifrazione quando attraversano

Caratteristiche		Unità di misura	1° Gruppo
Denominazione			Porcellana dura
Composizione chimica			Silico-alluminosa-alcalina
Impiego			Isolatori alta e bassa tensione per frequenze industr.
Caratteristiche principali			Medie
Peso specifico		gr/cmc	2,3 ÷ 2,5
Resistenza alla trazione		Kg/cmq	200 ÷ 400
Resistenza alla compressione		»	4000 ÷ 5000
Resistenza alla flessione		»	400 ÷ 900
Modulo di elasticità		Kg/mmq	7000 ÷ 8000
Durezza		Mohs	7 ÷ 8
Coefficiente di dilatazione termica tra 20 e 100 °C		mm/m °C	3,5 5 · 10^{-6}
Temperatura di cottura		°C	1380 ÷ 1460
Tensione di perforazione su provini		KV/mm	25 ÷ 35
Costante dielettrica		ε	4,5 6,5
Fattore di perdita a 50 Hz		tg $\delta \cdot 10^4$	170 ÷ 250
Fattore di perdita a 10^7 Hz		»	70 ÷ 120
Resistività di massa in funzione della temperatura	a 20 °C	$\Omega \cdot$ cm	> 10^{11}
	a 200 °C	»	1,6 · 10^7 ÷ 2 · 10^8
	a 300 °C	»	1,0 · 10^6 ÷ 4,0 · 10^7
	a 400 °C	»	1,6 · 10^5 ÷ 3,4 · 10^6
	a 500 °C	»	3,4 · 10^4 ÷ 4,5 · 10^5
	a 600 °C	»	1,0 · 10^4 ÷ 1,0 · 10^5

materiali ceramici per uso elettrotecnico.

2° Gruppo	3° Gruppo	4° Gruppo	5° Gruppo
Steatite	Impasti titaniferi	Cordierite-Steatite	Steatite porosa
Magnesiaca	Titanifera	Silico-alluminosa-magnesiaca	Silico-alluminosa-magnesiaca
Isolatori alta e bassa tensione per alte frequenze	Condensatori per alte frequenze	Apparecchi per alta temperatura ad alta frequenza	Supporti apparecchi termo-elettrici
Piccolo fatt. di perdita	Alta costante dielettrica	Piccola dilataz. termica	Resistenza termica
2,6 ÷ 2,8	3,6 ÷ 3,9	2,2	1,6 ÷ 2,5
550 ÷ 900	300 ÷ 600	260 ÷ 360	90 ÷ 160
8500 ÷ 10000	3000 ÷ 6000	3000 ÷ 5000	500 ÷ 2000
1200 ÷ 1600	900 ÷ 1500	500 ÷ 850	150 ÷ 400
9000 ÷ 11000	9000 ÷ 13000	9000	—
7 ÷ 8	7 ÷ 8	7 ÷ 8	—
$7 \div 9 \cdot 10^{-4}$	$6 \div 8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \div 4,8 \cdot 10^{-6}$
1380 ÷ 1410	1320 ÷ 1435	1380 ÷ 1410	1160 ÷ 1435
20 ÷ 45	10 ÷ 20	20	—
5,5 ÷ 6,5	40 ÷ 80	5,0 ÷ 5,5	?—
10 ÷ 30	—	200	—
70 ÷ 120	3 ÷ 15	40 ÷ 70	—
$6 \cdot 10^{8}$	—	—	—
$6 \cdot 10^{9}$	$1,2 \div 2,5 \cdot 10^{8}$	$1,2 \cdot 10^{8} \div 2,5 \cdot 10^{9}$	$3,2 \cdot 10^{9} \div 7,7 \cdot 10^{11}$
$1,0 \cdot 10^{6}$		$6,0 \cdot 10^{6} \div 7,0 \cdot 10^{7}$	$1,0 \cdot 10^{8} \div 2,5 \cdot 10^{9}$
$7,0 \cdot 10^{5}$		$5,0 \cdot 10^{5} \div 5,6 \cdot 10^{6}$	$1,0 \cdot 10^{7} \div 1,6 \cdot 10^{8}$
$1,0 \cdot 10^{4}$		$7,6 \cdot 10^{4} \div 7,6 \cdot 10^{5}$	$1,5 \cdot 10^{6} \div 1,8 \cdot 10^{7}$
$3,0 \cdot 10^{3}$		$2,4 \cdot 10^{3} \div 2,3 \cdot 10^{4}$	$3,6 \cdot 10^{5} \div 3,1 \cdot 10^{6}$

Denominazione		Materiali con elevato tenore di magnesio, isolanti elettrici per alte frequenze		
		Calit	Calan	Frequenta
Peso specifico	gr/cmc	2,6 ÷ 2,7	2,8	2,6 ÷ 2,8
Resistenza alla compressione	Kg/cmq	9500 ÷ 10000	5000 — 6000	9000 ÷ 9500
Resistenza alla trazione	Kg/cmq	650 ÷ 950	400 ÷ 500	550 ÷ 850
Resistenza alla flessione	Kg/cmq	1400 ÷ 1600	1600	1600
Modulo di elasticità	Kg/mmq	10800	11000	11000
Tensione di perforazione	KV/mm	35 ÷ 45	35 ÷ 45	27
Coeff. di dilatazione termica	mm/m°C	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \div 6,8 \cdot 10^{-6}$
Temperatura di rammollimento	°C	1440	1580	1440
Costante dielettrica	..	6,5	6,6	5,6
Fattore di perdita	a 300 KHz	0,041	0,036	0,020
	a 1000 KHz	0,038	0,032	0,028
	a 3000 KHz	0,037	0,028	0,030
	a 10000 KHz	0,034	0,026	0,038
	a 50000 KHz	0,032	0,025	0,050
Resistività di massa:				
a 300 °C	megaohms · cm	32000	—	25000
a 400 °C	»	16000	250000	2200
a 500 °C	»	180	10000	200
a 600 °C	»	32	630	41

Materiali con allumina e magnesio, isolanti elettrici resistenti alle alte temperature ed alle rapide variazioni termiche		Materiali con forte tenore di titanio per costruzione di condensatori		
Ardostan	Sipa	Condensa	Condensa C	Kerafar
2,2	2,2	3,7	3,9	3,5
2800 ÷ 4000	3000 ÷ 5000	6000 ÷ 9000	6000 ÷ 9000	6000 ÷ 9000
300 ÷ 360	260 ÷ 350	300 ÷ 800	300 ÷ 800	300 ÷ 800
830 ÷ 850	500 ÷ 650	900 ÷ 1500	900 ÷ 1500	900 ÷ 1500
7000	9000	11000	13000	11000
20	6	15 ÷ 20	10	10
$1,0 \div 1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \div 1,1 \cdot 10^{-6}$	$6 \div 7 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
1300	1400	1430	1480	—
—	—	40	80	70
—	—	0,097	0,072	0,20
—	—	0,08	0,06	0,15
—	—	0,072	0,041	—
—	—	0,061	0,032	0,12
—	—	0,057	0,028	—
80	6	120	2500	
5,6	0,8	—	—	·
0,8	0,1	—		—
0,23	0,024	—	—	—

obliquamente la superficie di separazione di due mezzi la cui costante dielettrica sia diversa.

La legge di questa rifrazione è la seguente:

Le tangenti degli angoli formati dalle linee di forza con la normale alla superficie stanno nel medesimo rapporto che le costanti dielettriche K *dei mezzi corrispondenti*; ciò si esprime con la relazione:

$$\mathrm{tg}\,\alpha : \mathrm{tg}\,\alpha' = K : K' \qquad (1)$$

Ne risulta che le linee di forza sono tanto più ravvicinate quanto più il mezzo entro cui passano possiede una costante dielettrica più elevata in rapporto al precedente e quanto più obliquamente esse tagliano la superficie di separazione.

La figura 2 mostra la rifrazione ed il ravvicinamento delle linee di forza al passaggio dall'aria ($K' = 1$) alla porcellana ($K = 5{,}5$).

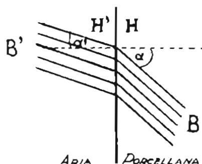


Fig. 2

Da quanto sopra nasce un'altra legge:

L'intensità della polarizzazione dielettrica o densità delle linee di forza ha per valore il prodotto di K per la forza del campo.

Si ha dunque per ciascuna delle sostanze di costante K e K':

$$B = K\,H$$
$$B' = K'\,H' \qquad (2)$$

Una conseguenza della rifrazione è che le induzioni B sono inversamente proporzionali ai coseni degli angoli:

$$B : B' = \cos\alpha' : \cos\alpha \qquad (3$$

mentre le forze del campo sono inversamente proporzionali ai seni degli stessi angoli:

$$H : H' = \text{sen}\ \alpha' : \text{sen}\ \alpha \qquad (4)$$

L'ionizzazione dell'isolante e per conseguenza la rigidità dielettrica non dipendono dalla densità delle linee di forza B, ma dalla grandezza della forza stessa di modo che è l'equazione (4) che interverrà.

La forza elettrica è una condizione della scarica sempre necessaria ma non sufficiente. La scarica dipende in ultima analisi da una ionizzazione conveniente.

Il ritardo alla scarica costituisce già un caso dove non c'è la scarica, benchè la forza sia sufficiente, poichè l'ionizzazione indispensabile non è realizzata.

Un altro caso analogo è dato dai risultati che si ottengono con l'unione in serie di due isolanti. Fig. 3.

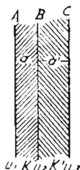


Fig. 3.

Consideriamo il caso più semplice in cui le linee di forza siano normali alla superficie di separazione ($\alpha = \alpha' = 0$).

Ne risulta:

$$B = B' = K H = K' H' \qquad (5)$$

Questo caso è realizzato quando due superfici conduttrici piane (elettrodi) di potenziale rispettivamente U_1 e U_3 sono separate da due superfici parallele isolanti di spessore a e a'. Se E è la tensione a cui

soggiace il sistema si ha:

$$U_1 - U_3 = E$$

Essendo le linee di forza perpendicolari ai due elettrodi, la superficie di separazione dei due isolanti è una superficie di livello il cui potenziale ancora sconosciuto è U_2. Ne risulta che la forza elettrica (caduta o gradiente di potenziale) nella superficie di sinistra è:

$$H = \frac{U_1 - U_2}{a}$$

ed in quella di destra:

$$H' = \frac{U_2 - U_3}{a'}$$

dove

$$U_1 - U_2 = a\,H$$
$$U_2 - U_3 = a'\,H'$$

La somma di queste due uguaglianze dà:

$$U_1 - U_3 = \mathbf{E} = a\,H + a'\,H'$$

Ora per la (5) si ha

$$K\,H = K'\,H'$$

Le due ultime equazioni danno dunque i valori delle forze elettriche:

$$H = \frac{E}{a + a'\dfrac{K}{K'}} \qquad (6)$$

$$H' = \frac{E}{a' + a\dfrac{K'}{K}} \qquad (7)$$

Se si chiama H il valore che avrebbe la forza elettrica nel caso che l'intervallo $A\ C$ fosse riempito di una sostanza di costante dielettrica $K = K'$, si ha:

$$H_r = \frac{E}{a + a'} \quad (^1)$$

Queste tre ultime formule mostrano che se $K > K'$ si ha $H < H_r < H'$.

Se ne deduce la regola seguente:

Quando due isolanti di differente costante dielettrica sono messi in serie, la forza elettrica nell'isolante a grande costante dielettrica è inferiore (nell'isolante a piccola costante è superiore) al valore che essa avrebbe se tutto lo spazio fosse occupato da un isolante unico.

Consideriamo come esempio il caso di una placca di porcellana ($K = 5{,}5$) di spessore $a = 0{,}4$ cm. messa tra due elettrodi distanti $a + a' = 1$ cm.· in modo che resti uno spazio d'aria ($K' = 1$) $a' = 0{,}6$ cm.

Se la tensione è di 100 unità elettrostatiche, la forza elettrica nella porcellana è:

$$H = \frac{100}{0{,}4 + 0{,}6 \times 5{,}5} = 27$$

e la forza elettrica nell'intervallo d'aria è:

$$H' = \frac{100}{0{,}6 + \frac{0{,}4}{5{,}5}} = 149$$

mentre prima dell'introduzione della placca di porcellana la forza elettrica era:

$$H_r = \frac{100}{1} = 100$$

L'introduzione della placca di porcellana ha dunque fatto crescere il valore della forza elettrica da 100 a 149 e perciò la scarica non può prodursi poichè l'elettricità dovrebbe nel medesimo tempo attra-

(¹) Il fatto che l'indice K non figura in questa espressione si spiega notando che la differenza di potenziale $U_1 - U_2$ è costante ed uguale ad E e che la forza elettrica è sempre uguale alla caduta di potenziale per cm o gradiente di potenziale. H_r è dunque necessariamente indipendente dalla costante.

versare la porcellana; ma la forza nella placca è così debole (27) che l'ionizzazione necessaria al passaggio dell'elettricità non si produce.

La rigidità dielettrica dell'insieme viene dunque accresciuta per l'interposizione della placca e questo si verificherebbe pure nel caso che la placca avesse una rigidità dielettrica inferiore a quella dell'aria.

La scarica non può dunque prodursi che nel caso in cui l'elettricità può attraversare i due isolanti, senza di ciò il percorso della corrente non può chiudersi. Ne risulta che si può, con dei dispositivi di questo genere, ottenere nell'insieme una rigidità dielettrica più grande che se tutti gli spessori fossero sottoposti allo stesso sforzo.

Teoricamente l'isolamento realizzato è tanto migliore quanto più la placca interposta è sottile, poichè nell'esempio precedente la forza elettrica tende asintoticamente verso il valore $\frac{100}{5{,}5} = 18{,}2$ nella porcellana e $\frac{100}{1} = 100$ nell'aria.

Praticamente, l'impicciolimento della placca ha un limite per cui la sua rigidità dielettrica diventa bruscamente nulla per la presenza di particelle conduttrici o porose che ne occupano tutto lo spessore.

Se gli elettrodi non sono dei piani ma dei cilindri concentrici le linee di forza sono più ravvicinate intorno all'asse ed ivi la forza elettrica è più elevata e quando si è in presenza di due sistemi isolanti come l'aria e la porcellana ne risulta da quanto precede che lo sforzo elettrico nella porcellana è più debole se essa è all'esterno che se essa è all'interno.

Se le linee di forza non sono normali alla superficie di separazione delle due sostanze, bisogna applicare le relazioni (1) e (4) in luogo della (5). La ripartizione della forza elettrica dipende allora non solo dagli spessori o dalla costante dielettrica delle due sostanze, ma anche dall'angolo d'incidenza delle linee di forza. Ne risulta che la differenza tra il valore del campo elettrico nelle due sostanze è tanto più piccola quanto più le linee di forza sono vicine alla normale e quanto più le costanti dielettriche sono vicine l'una all'altra.

Tutto quanto precede presuppone implicitamente che le due

sostanze in esame siano degli isolanti perfetti di costituzione fisica omogenea, non aventi alcun potere conduttore sensibile sia metallico sia elettrolitico. Ma se una di esse possiede un potere conduttore apprezzabile o una superficie conduttrice, la superficie di separazione B (fig. 3) si mette al potenziale dell'elettrodo col quale è collegata.

Si ha allora:

$$U_2 - U_3 = E$$

e per conseguenza

$$H' = \frac{E}{a'}$$

Prima dell'introduzione della placca la forza elettrica era:

$$H_0 = \frac{E}{a + a'}$$

La presenza di questa placca equivale allora ad un accrescimento della forza elettrica e, per conseguenza ad un aumento di sforzo nell'altro isolante, tanto più grande quanto più la placca è spessa. Il risultato di questa combinazione è molto cattivo.

Si è supposto anche che nessuna delle sostanze isolanti contenesse pori che attraversino tutto lo spessore, se no l'aria sarebbe ionizzata e resa conduttrice, alla stessa maniera che se un filo conduttore attraversasse l'isolante. Le linee di forza seguirebbero allora il percorso rappresentato in figura 4, cioè l'altro isolante verrebbe sottoposto ad uno sforzo particolarmente elevato.

L'introduzione di una placca difettosa non migliora dunque il dispositivo, ma anzi ne diminuisce notevolmente la qualità.

Esperienze superficiali con placche conduttrici o porose hanno contribuito a diffondere l'opinione errata che l'introduzione di una placca isolante solida era particolarmente cattiva.

Negli isolatori passanti per conduttori ad alta tensione attraverso la carcassa dei trasformatori ecc., si realizza la rigidità dielettrica massima, col minimo di materiale, facendo passare il filo in un grosso tubo di porcellana che lascia ancora un vasto spazio d'aria tra il filo e le sue pareti, oppure mettendo in serie diversi isolanti entro il pas-

sante in porcellana, come nei passanti a condensatore come vedremo in seguito. La rigidità dielettrica di questo insieme è più grande che se tutto lo spazio compreso tra il conduttore ed il recipiente metallico fosse riempito unicamente di porcellana.

Un tempo si usavano tubi spessi ottenuti unendo insieme dei tubi di porcellana o con cemento o allo smalto, ma questi sistemi furono poi abbandonati perchè si ottennero risultati migliori con un'unione in serie di aria e porcellana.

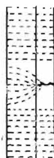


Fig. 4.

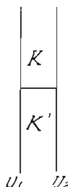


Fig. 5.

Le condizioni sono diverse quando due isolanti sono uniti in parallelo in rapporto alle linee di forza del campo elettrico (fig. 5).

Se gli elettrodi paralleli di potenziale U_1 e U_2 sono distanti a la forza elettrica in ciascun isolante è:

$$H = \frac{U_1 - U_2}{a} = \frac{E}{a}$$

Invece la densità delle linee di forza ha per valore rispettivamente nei due isolanti:

$$B = K H = K \frac{E}{a}$$

$$B' = K' H = K' \frac{E}{a}$$

Per il passaggio dell'elettricità non è la quantità di linee di forza

o la densità di queste che importa, ma la forza elettrica *H* che è la stessa nei due isolanti, pertanto, nella maggioranza dei casi la scarica si produrrà più presto nell'uno o nell'altro di essi e precisamente in quello in cui la rigidità dielettrica è più debole, cioè in quello che è più fortemente ionizzato dalla stessa forza elettrica.

La forza elettrica è, come abbiamo già visto, una condizione necessaria ma non sufficiente. La scarica ha per causa definitiva una conveniente ionizzazione, ciò che è una proprietà particolare di ogni isolante, che non è proporzionale nè alla costante dielettrica *K* dell'isolante, nè alla sua rigidità dielettrica.

Ciò suppone che le linee di forza restino parallele su tutto il loro percorso e ciò non è quando due isolanti sono messi nello stesso tempo in serie ed in parallelo come nell'esempio della fig. 6.

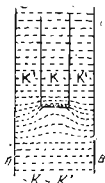


Fig. 6.

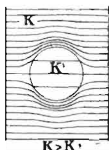


Fig. 7.

Una placca di costante dielettrica elevata *K* è messa in un mezzo di una costante più debole *K'* (es. una placca di porcellana nell'aria.)

Le linee di forza sono in un certo qual modo attirate dalla placca; ne risulta che la loro densità e, per conseguenza, l'intensità della forza elettrica, vicino al bordo della placca è più grande di prima, ciò che può generare una scarica, mentre la stessa tensione non poteva generarla prima dell'introduzione della placca.

Se invece la placca ha dimensioni sufficienti per sporgere largamente da tutte le parti degli elettrodi, le linee di forza attraversano allora uno dopo l'altro i due isolanti che vengono a trovarsi così in serie e

la rigidità dielettrica viene ad essere notevolmente aumentata, a meno che la sostanza introdotta non sia difettosa e non produca essa stessa una scarica prematura.

Riferendoci ad un esempio pratico, vediamo l'effetto nefasto che può esercitare una bolla d'aria di costante dielettrica $K' = 1$ in seno ad uno spessore di porcellana di costante dielettrica più elevata K, come in fig. 7.

Le linee di forza contornano tanto meglio la bolla e si ravvicinano quanto più è grande il rapporto.

$$\frac{K}{K'}$$

La forza elettrica è dunque notevolmente aumentata intorno alla bolla e ciò produce l'abbassamento della tensione di scarica.

Nel caso che la bolla d'aria fosse già ionizzata, la scarica l'attraverserebbe.

Non è dunque possibile prevedere se la scarica contornerà o attraverserà la bolla; ma in ogni caso la sua presenza costituisce un punto debole poichè equivale alla messa in parallelo di due dielettrici differenti.

CAPITOLO II

CARATTERISTICHE DEGLI IMPASTI E DELLA PORCELLANA PER ISOLATORI

Fra i materiali impiegati come isolanti hanno una posizione predominante quelli ceramici. Fra questi i prodotti più idonei sono quelli a massa compatta o greificata, perchè altrimenti attraverso i pori può avvenire la ionizzazione dell'aria racchiusa causando, per il passaggio di corrente, delle fusioni locali che porterebbero alla perforazione ossia alla distruzione dell'isolatore. Inoltre una massa porosa presenta la possibilità di assorbimento di vapori e gas che per la loro conducibilità annullerebbero il potere isolante.

Composizione della pasta.

La porcellana ben rispondendo ai requisiti richiesti è il materiale che meglio si adatta allo scopo.

La porcellana è un composto eterogeneo formato, allo stato crudo, da una miscela di sostanza argillosa (caolino-argilla = Al_2O_3 $2SiO_2$ $2H_2O$) di quarzo (SiO_2) e di feldspato (Al_2O_3 $6SiO_2$ $\begin{matrix} K_2O \\ Na_2O \end{matrix}$).

Quest'ultimo normalmente è una miscela di feldspati sodici, potassici e calcici. Le percentuali di questi tre elementi variano come segue:

Sostanza argillosa	45 ÷ 60 %
Quarzo	20 ÷ 30 %
Feldspato	20 ÷ 25 %

La composizione in definitiva varia a seconda del prodotto che

si vuole ottenere ed è in diretta funzione delle necessità derivanti dalla formatura, dalla temperatura di cottura e dalle caratteristiche d'impiego del prodotto finito.

Per la formatura è necessario avere una pasta sufficientemente plastica, che possa essere facilmente plasmata nelle forme volute.

Inoltre si deve tener presente il ritiro dal pezzo umido al secco ed il comportamento all'essiccamento in modo da non avere screpolature. Gli elementi che giuocano in questa caratteristica sono il quarzo e la sostanza argillosa, come dimagrante il primo e come plastificante il secondo.

La temperatura di cottura deve produrre una completa greificazione senza però eccedere nel rammollimento della massa per non avere delle deformazioni eccessive e deve inoltre far sì che si compiano quelle trasformazioni chimico-fisiche imposte dalle caratteristiche d'impiego. L'elemento che sopratutto influisce nel processo di cottura è il feldspato che è l'elemento fondente.

Costituzione della massa dopo cottura.

Di particolare importanza è la costituzione chimico-fisica del prodotto dopo la cottura.

La porcellana è un miscuglio di una massa vetrosa formata specialmente da silicati alcalini, da cristalli di mullite e da silice libera, specialmente sotto forma di cristobalite.

La qualità di tali componenti è in relazione alla composizione ed alla macinazione della pasta ed alla temperatura di cottura. Per quanto riguarda strettamente gli isolatori di porcellana sembra che le migliori caratteristiche elettro meccaniche si raggiungano quando nella massa predomina la mullite.

Infatti in una massa eccessivamente vetrosa, oltre ad avere delle caratteristiche meccaniche inferiori, entra in giuoco anche la notevole quantità di alcali necessaria. Tali alcali sono collegati sotto forma di ioni alla struttura reticolare della massa ed essendo la forza ionica che li tiene vincolati alla struttura, relativamente debole, possono, in particolari condizioni (alta frequenza, elevata temperatura, ecc), essere

spostabili e dar luogo ad una vera e propria formazione di corrente attraverso alla porcellana.

È questo il motivo principale dell'uso negli impasti di porcellana elettrica, di argilla, perchè facilita la sinterizzazione con un minor quantitativo di feldspato. La cristobalite è meglio sia evitata al massimo poichè data la sua elevata e non omogenea dilatazione porterebbe alla formazione di tensioni interne e di tensioni tra massa e vernice con gli evidenti e conseguenti inconvenienti.

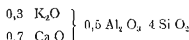
Concludendo, i fattori che predominano nella formazione della porcellana sono: composizione, grado di finezza della pasta, metodo di formatura e cottura.

La variazione di uno di tali fattori può portare a delle grandi variazioni delle caratteristiche del prodotto finale.

Composizione della vernice.

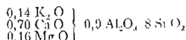
La massa di porcellana è di solito ricoperta dalla cosidetta vernice che è un leggero strato di vetro.

Tali vernici sono formate da un complesso di silicati che si possono esprimere sotto la formula di Seger:
per temperature fino al cono Seger 10 (1280°C)



$$\left.\begin{matrix} 0{,}3\ K_2O \\ 0{,}7\ CaO \end{matrix}\right\}\ 0{,}5\ Al_2O_3\ 4\ SiO_2$$

per temperature fino al cono Seger 14 (1410°C)



$$\left.\begin{matrix} 0{,}14\ K_2O \\ 0{,}70\ CaO \\ 0{,}16\ MgO \end{matrix}\right\}\ 0{,}9\ Al_2O_3\ 8\ SiO_2$$

Le materie prime componenti sono:

Quarzo;
Feldspato;
Dolomia;
Caolino;
Carbonati di calcio, ecc.

Caratteristica essenziale della vernice è l'accordo perfetto chimico e fisico con la pasta; sopratutto deve avere un coefficiente di dilatazione molto vicino a quello della pasta per evitare che col variare della temperatura si abbiano delle tensioni interne che possono generare i noti difetti del cavillo e della scaglia intaccando la omogeneità del pezzo.

CAPITOLO III

PROPRIETÀ FISICHE DELLA PORCELLANA PER ISOLATORI

Le proprietà fisiche della porcellana per isolatori sono di capitale importanza, specialmente per quegli isolatori che devono essere soggetti simultaneamente a sforzo meccanico ed a carico elettrico.

Le principali caratteristiche della porcellana per isolatori sono:

a) *Resistenza meccanica.* — Gli isolatori sono soggetti a seconda del loro impiego a sforzi di trazione, di compressione, di flessione e di torsione.

La maggior resistenza della porcellana si ha alla compressione, la minore alla trazione.

I valori di queste resistenze per porcellana per isolatori sono:

Resistenza	alla	compressione	Kg/cmq.	4000 ÷ 5000
»	»	trazione	»	200 ÷ 400
»	»	torsione	»	500 ÷ 700
»	»	flessione	»	400 ÷ 900

La durezza della porcellana è circa 7 della scala di Mohs.

La maggior resistenza meccanica si ottiene nelle paste ricche di mullite, come abbiamo già detto. È per questo che la pasta per porcellana dura per isolatori deve essere ricca di materiali argillosi che per cottura alle alte temperature si trasformano appunto in cristalli aghiformi di mullite.

b) *Resistenza disruptiva o rigidità dielettrica.* — Un buon isolatore deve resistere ad una tensione di perforazione tale che sia al-

meno uguale a 1,5 volte la tensione di arco superficiale a secco. Ne deriva quindi la necessità che la porcellana abbia delle caratteristiche elettriche atte a sopportare la tensione di perforazione minima richiesta.

La resistenza disruptiva o rigidità dielettrica non aumenta proporzionalmente allo spessore della porcellana, ma in maniera molto minore, e precisamente in modo che per uno spessore grande essa è inferiore per ogni millimetro di spessore a quella di uno spessore sottile. Ciò proviene dal fatto che la porcellana a spessore grande non può essere fabbricata perfettamente esente dalle piccolissime soffiature come la porcellana sottile. Inoltre la porcellana possiede una resistenza disruptiva tanto maggiore quanto più la massa è meglio lavorata e meglio cotta. Un eccesso di cottura è però altrettanto nocivo che una cottura incompleta.

La formazione di cristalli di sillimanite (mullite) costituisce un tratto caratteristico della porcellana ad elevata cottura.

Per constatare che una porcellana del tipo in esame è perfettamente cotta, occorre tagliare una parte sottile ed esaminare al microscopio se si sono formati o no questi cristalli di sillimanite che non si formano che ad una cottura prolungata al cono Seger 14.

La curva in fig. 8 mostra come la rigidità dielettrica aumenta in proporzione allo spessore.

c) *Resistività di massa.* — Questa caratteristica non ha grande importanza per gli isolatori di linea ad alta tensione, poichè si è osservato che, per buone porcellane, gli isolatori che hanno minori angoli di perdita non sempre hanno miglior comportamento in servizio; presenta invece importanza sensibile per gli isolatori telegrafici, per quelli ad alta frequenza e per alcuni tipi di isolatori passanti in cui la porcellana ha funzione specifica di isolamento e non solo di protezione dagli agenti atmosferici.

Abbiamo già detto come questa caratteristica diminuisca rapidamente con l'aumento della temperatura.

Dietrich trovò che per una porcellana normale a contenuto feldspatico è perfettamente corrispondente ai dati sperimentali la formula seguente:

$$Kt = \frac{R_0}{R_t} = e^{\frac{5336 \times t}{273\,(273 + t)}}$$

dove

K_t = Conduttività di massa alla temperatura di t centigradi per $R = 1$;
R_0 = Resistività di massa a zero centigradi;
R_t = Resistività di massa a t centigradi;
e = Base dei logaritmi neperiani = 2,7183.

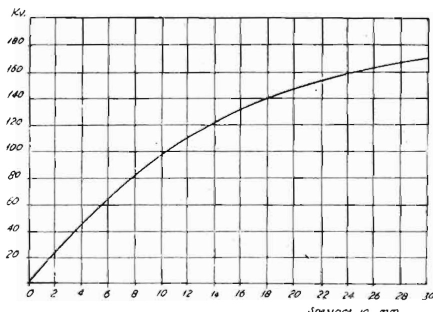


Fig. 8.
Tensione di perforazione in funzione dello spessore

In base a questa formula è stato ricavato il diagramma seguente dovuto a Kinnison (fig. 9).

d) *Dilatazione termica.* — Gli isolatori, sia montati in linea sia su apparecchiature, sono soggetti a subire sbalzi di temperatura o per cause esterne o per cause interne dell'apparecchiatura stessa. Per la sua costituzione, poichè è formata da vetro e mullite che hanno un

basso coefficiente di dilatazione, la porcellana ha pure una bassa dilatazione termica.

Il coefficiente di dilatazione della porcellana tra 20 e 100 °C è compreso tra $3{,}5 \div 5 \cdot 10^{-6}$.

Questa dilatazione è però sufficiente per l'impiego degli isolatori poichè in genere essi non vengono mai ad essere soggetti a sbalzi superiori ai $50 \div 60$ °C.

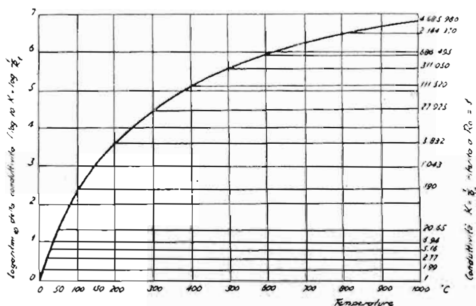


Fig. 9.
Conduttività (K) a varie temperature della porcellana feldspatica riferita alla conduttività a 0° C ($R_o = 1$)

e) *Porosità*. — È necessario che la porcellana tecnica non sia porosa per le ragioni stesse dell'uso a cui deve servire, cioè impedire il passaggio di corrente attraverso alla sua massa. La prova di porosità viene fatta su frammenti di isolatori immersi in soluzione alcoolica di fucsina all'1 % in peso, ad una pressione tale (non inferiore però a 70 Kg/cmq.) che il prodotto della pressione per le ore di immersione non sia inferiore a 2400.

$$p \times h = 2400$$

Al termine della prova non si deve notare alcuna penetrazione di materia colorante nella massa.

La porosità della porcellana dipende moltissimo dalla temperatura di cottura.

Impossibilità di coesistenza delle migliori qualità fisiche.

Le migliori qualità fisiche della porcellana non sono tutte realizzabili contemporaneamente poichè le migliorie apportate ad una qualità vanno, in genere, a scapito di un'altra. Ad esempio aumentando la resistenza meccanica si diminuisce la rigidità dielettrica.

Riportiamo qui sotto nella fig. 10 un diagramma triangolare dovuto a Gilchrest e Klinefelter, che mette in luce l'impossibilità di coesistenza delle varie qualità fisiche sullo stesso piano di valori.

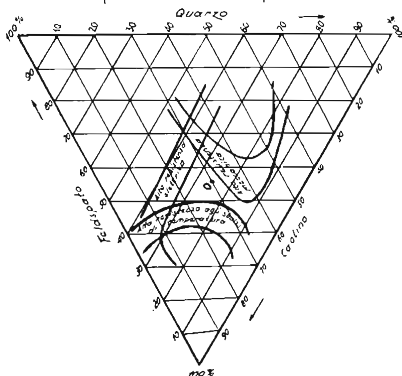


Fig. 10
Influenza dei componenti sulle proprietà fisiche della porcellana.

Per ogni punto del diagramma le tre normali abbassate sui lati del triangolo equilatero rappresentano le percentuali del componente indicato nel vertice opposto; la somma delle tre normali è in ogni caso uguale a 100. Le aree comprese tra le tre coppie di curve contengono punti di composizioni aventi al massimo grado le qualità segnate tra le curve stesse.

Poichè è impossibile, come abbiamo visto, ottenere pari qualità fisiche nella porcellana, l'abilità dei fabbricanti sta nel realizzare un prodotto che soddisfi in modo sufficiente alle qualità a questo richieste. Bisognerà quindi ottenere una porcellana la cui percentuale fra i componenti sia compresa nello spazio interno lasciato libero dalle tre curve doppie.

Così una porcellana avente composizione corrispondente al punto *O* cioè col 30 % di quarzo, 25 % di feldspato e 45 % di caolino, per tipi di porcellane cotte ad alte temperature (cono Seger 13 ÷ 14 corrispondenti a 1380 - 1410 °C) cioè tipi di porcellane Europee, soddisfa sufficientemente ai tre requisiti essenziali considerati senza possederne nessuno al massimo grado.

Nella tabella seguente riassumiamo i valori delle proprietà fisiche della porcellana dura per isolatori.

TABELLA VI.

Proprietà fisiche della porcellana dura per isolatori.

Denominazione delle grandezze	Unità di misura	Valori
Peso specifico su polvere	gr/cmc	2,3 ÷ 2,5
Peso specifico su pezzi	»	2,2 ÷ 2,4
Durezza	Mohs	7 ÷ 8
Temperatura di cottura	°C	1380 ÷ 1460
Temperatura di rammollimento	»	1500 ÷ 1550
Resistenza alla trazione	Kg/cmq	200 ÷ 400
Resistenza alla compressione	»	4000 ÷ 5000
Resistenza alla torsione	»	500 ÷ 700
Resistenza alla flessione	»	400 ÷ 900
Coefficiente di deformaz. elastica per trazione e compressione	mmq/Kg	$125 \div 143 \cdot 10^{-4}$
Modulo di elasticità	Kg/mmq	7000 ÷ 8000
Coeff. di dilatazione termica tra 20 e 100 °C.	mm/m °C	$3,5 \div 5 \cdot 10^{-6}$
Calore specifico	Cal/Kg °C	0,20 ÷ 0,25
Conducibilità calorifica	Cal/h mc °C	0,7 ÷ 0,8
Rigidità dielettr. su provini di 3÷4 mm di spess.	KV/mm	25 ÷ 35
Rigidità dielettrica su isolatori:		
spessore 1 cm	»	8,5 ÷ 10
spessore 2 cm	»	6 ÷ 7
spessore 3 cm	»	5 ÷ 6
Resistività di massa o interna o resist. di isol.:		
a 20 °C	$\Omega \cdot$ cm	$> 10^{14}$
a 200 °C	»	$\sim 2 \cdot 10^{8}$
a 300 °C	»	$10^{6} \div 4 \cdot 10^{7}$
a 400 °C	»	$1,6 \cdot 10^{5} \div 3,4 \cdot 10^{6}$
a 500 °C	»	$3,4 \cdot 10^{4} \div 4,5 \cdot 10^{6}$
a 600 °C	»	$10^{4} \div 10^{5}$
Resistività superficiale con umidità relativa 30 %	Ω	$(20 \div 40) \cdot 10^{12}$
Resistività superficiale con umidità relativa 90 %	»	$(20 \div 40) \cdot 10^{7}$
Angolo di perdita a 50 Hz	$\mathrm{tg}\,\delta \cdot 10^{4}$	170 ÷ 250
Angolo di perdita a 10^{7} Hz	»	70 ÷ 120
Costante dielettrica	ε	4,5 ÷ 6,5

CAPITOLO IV

CICLO DI LAVORAZIONE PER LA FABBRICAZIONE DEGLI ISOLATORI DI PORCELLANA

Preparazione pasta.

La preparazione della pasta si effettua nel reparto Mulino. Le materie prime necessarie alla preparazione della pasta, cioè caolino, quarzo e feldspato arrivano alla fabbrica e vengono depositati in silos. Il quarzo ed il feldspato vengono poi macinati in mulini ad umido ruotanti a tamburo a carcassa di ferro, rivestiti internamente di blocchi di porcellana, per mezzo di ciotoli duri flint. (fig. 11).

La macinazione dura dalle 15 alle 20 ore, quindi la miscela viene introdotta negli scioglitori dove ai primi due componenti viene aggiunto il caolino. Gli scioglitori sono delle vasche circolari che possono essere di cemento o di legno e sono muniti di agitatori.

In essi i tre componenti vengono mescolati fino ad ottenere una miscela omogenea. Dallo scioglitore la massa fluida passa sopra le elettrocalamite che hanno lo scopo di trattenere le impurità metalliche che eventualmente fossero mescolate alla massa. La pasta fluida passa poi sopra uno staccio di bronzo fosforoso a vibrazione o rotativo e viene immessa in una vasca di raccolta dove è tenuta in movimento da un agitatore. Per mezzo di pompe a membrana che lavorano ad una pressione di $7 \div 8$ atmosfere, la pasta fluida viene mandata alle filtropresse dove è pressata e filtrata togliendo la maggior parte di acqua e si ottengono le cosidette torte.

Le torte dopo un breve periodo di stagionatura passano alle impastatrici che possono essere di due tipi: impastatrici comuni ed impastatrici a vuoto.

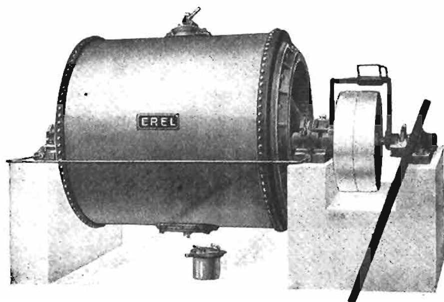


Fig. 11.
Mulino a tamburo.

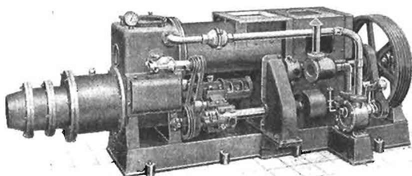


Fig. 12.
Impastatrice a vuoto Reissmann.

Le prime sono formate da un piano circolare di granito sul quale girano due rulli orizzontali e quattro verticali in modo che la pasta viene fortemente lavorata ed impastata in forma di anelli a sezione quadrata.

Le impastatrici a vuoto sono invece delle macchine munite di una tramoggia di carico, di una coclea per l'impastatura e l'avanzamento della pasta e di una camera in cui vien fatto il vuoto estraendo l'aria per mezzo di una pompa. Da queste esce un filone compatto di forma cilindrica. (fig. 12).

Lo scopo delle impastatrici è di togliere l'aria dalla pasta e di dare ad essa una maggiore plasticità. La pasta così ottenuta è pronta per le successive lavorazioni.

Foggiatura.

La pasta proveniente dalle impastatrici passa nel reparto foggiatura dove subisce una lavorazione preliminare: la sbozzatura.

Questa consiste nel porre il filone di pasta su un tornietto verticale e nel lavorarlo a mano con l'aggiunta di acqua, con lo scopo di togliere gli eventuali residui d'aria rendendola perfettamente omogenea e nello stesso tempo di dare allo sbozzo una forma tale da essere ricevuta nel modello di gesso che riproduce la forma esterna dell'isolatore che si vuole ottenere.

Nel modello la pasta viene compressa per mezzo di una pressa a mano poi il tutto vien messo su un tornietto verticale dove per mezzo di una sagoma d'acciaio montata su un braccio a leva si ottiene la forma interna dell'isolatore che viene poi deposto col suo modello su uno scaffale (fig. 13).

Sia per effetto del potere assorbente del gesso come per il ritiro stesso della porcellana, il pezzo dopo qualche ora può essere tolto dal modello.

La fig. 14 mostra un isolatore a sospensione nelle sue diverse fasi di lavorazione.

Per gli isolatori passanti si procede nel modo seguente:

Dopo la preparazione dello sbozzo e successivo indurimento vie-

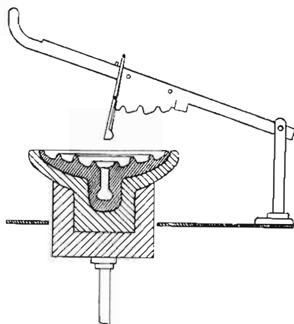


Fig. 13.
Sagoma per la formatura interna dell'isolatore

ne praticato in esso un foro e vi si infila un'asta munita di piede o flangia e per mezzo di questa e di una contropunta viene fissato su un tornio orizzontale indi con opportune sagome o con ferro a mano si ottiene il profilo esterno voluto.

Per gli isolatori portanti si procede alla tornitura esterna dello

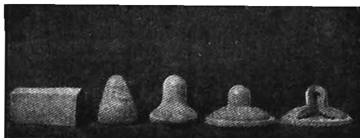


Fig. 14.
Isolatore a sospensione nelle sue diverse fasi di lavorazione.

sbozzo su un tornio verticale a contropunta per mezzo di una sagoma montata su ghigliottina.

Per gli isolatori di dimensioni rilevanti difficilmente ottenibili in un sol pezzo, sia come sbozzo sia come tornitura, si procede a preparare i singoli sbozzi ed alla tornitura delle singole parti che poi vengono congiunte insieme per mezzo di uno strato di pasta fluida, fino ad ottenere il pezzo voluto.

Gli isolatori così ottenuti vengono posti sugli scaffali o messi in camere di essiccazione alla temperatura di 40÷50°C per un periodo di 7÷10 giorni in relazione alle loro dimensioni ed ai loro spessori.

Colaggio.

Un altro metodo di foggiatura è il colaggio che serve per ottenere pezzi che per la loro forma o per altre difficoltà non possono essere foggiati o ricavati al tornio. Si provvede perciò a colare in forme di gesso scomponibili la pasta fluida con un eccesso per compensare il ritiro per il contatto con le pareti assorbenti.

Il potere assorbente del gesso fa essiccare lungo le pareti del modello uno strato uniforme di pasta per cui dopo alcune ore, rovesciato l'eccesso di pasta fluida e scomposto il modello, si ricava il pezzo di forma voluta.

Il colaggio può essere fatto anche con modello e contromodello che lasciano tra loro uno spazio vuoto che si riempie di pasta fluida e riproduce la forma dell'isolatore.

Pressatura.

Per pezzi di piccole dimensioni e di forma complessa, come valvole, interruttori, ghiere, basette, ecc. serve il metodo della pressatura, anche perchè entra in gioco il fattore economico, potendosi con questo sistema aumentare fortemente la produzione.

Si procede a preparare uno stampo metallico d'acciaio in due pezzi, riproducente in negativa la forma del pezzo che si vuole ottenere; la femmina dello stampo viene fissata sul banco di una pressa,

che può essere a mano o meccanica, e riempita in sovrabbondanza con pasta umida o secca o semisecca a seconda del metodo e delle pressioni impiegate, il maschio viene applicato alla parte mobile della pressa che scendendo sul banco comprime la pasta interposta. La parte inferiore dello stampo è munita di estrattore che permette, a pressione avvenuta, l'estrazione del pezzo dalla matrice. Di solito per lo stampaggio di materiale elettrico la pasta viene inumidita con leganti vischiosi e volatili (es. olii) che si eliminano con la cottura, poichè dato il tipo magro degli impasti viene a mancare il potere legante dei materiali argillosi.

Finitura e verniciatura.

Dall'essiccatoio gli isolatori passano alla finitura dove vengono misurati e controllati per vedere se presentano screpolature od altri difetti; vengono arrotondati gli spigoli, praticate le cave antitorsione per i tipi che ne necessitano ed in genere vengono fatte tutte quelle operazioni necessarie perchè il prodotto che in seguito passa alla verniciatura ed alla cottura presenti i requisiti di dimensioni e qualità richiesti.

Prima della verniciatura i pezzi che presentano spessori sottili, come in genere gli isolatori passanti, passano a subire una precottura nel forno cosidetto di biscotto, alla temperatura di 800 ÷ 900 °C, che dà loro una consistenza tale da permettere una maggiore maneggiabilità.

La verniciatura viene fatta per immersione in un bagno a cassone munito di agitatore per evitare il depositarsi dei materiali a peso specifico maggiore entranti a far parte della vetrina.

Questa è composta di materie simili a quelle che costituiscono la pasta della porcellana stessa, contiene però un maggior quantitativo di materie vetrificanti.

Varie sono le colorazioni richieste per gli isolatori e queste si ottengono per aggiunta di ossidi metallici. Il colore bianco non è tale ma è ottenuto per applicazione di una vernice trasparente. Il colore bruno si ottiene con aggiunta di ossidi di ferro; il verde con ossidi di cromo, ecc.

L'applicazione della vernice fa sì che dopo la cottura l'isolatore si presenta rivestito di un ottimo smalto lucido.

La verniciatura degli isolatori ha due scopi e cioè:

1) dal punto di vista elettrico, di ricoprire di uno smalto protettore, che renda meno facile il depositarsi di polvere, la superficie degli isolatori che per la loro esposizione agli agenti atmosferici sono soggetti ad insudiciarsi rendendo la superficie conduttrice;

2) dal punto di vista meccanico, poichè è provato che la vernice ha la sua importanza nel senso che prove a trazione eseguite su bastoni di porcellana con vernice e privi di vernice hanno dato risultati favorevoli al primo caso.

Cottura.

La cottura è il più importante trattamento che subisce la porcellana. Possono a questo scopo essere usati tre tipi di forni e cioè il forno intermittente a fiamma rovesciata, il forno a camere a gas ed il forno continuo a tunnel.

Nei primi due tipi di forni la merce viene messa, per la protezione dai prodotti della combustione, in cassette di materiale refrattario che vengono messe in colonne e rimangono ferme al loro posto mentre viene variata la temperatura da quella ambiente a quella di cottura.

Nei secondi la merce viene caricata su carrelli che percorrono il tunnel cominciando dalla zona di lento riscaldamento, passando nella zona del fuoco e finalmente a quella di raffreddamento mentre la temperatura viene mantenuta costante in ogni punto del forno.

Per la cottura degli isolatori ed in genere per i pezzi di una certa dimensione, l'esperienza ha dimostrato che servono meglio i vecchi forni intermittenti ed i forni a camere a gas, mentre il forno continuo a tunnel serve per la cottura di materiale leggero come vasellame di uso corrente ecc.

La fig. 15 mostra un forno intermittente a fiamma rovesciata, a due piani. Alimentata da 6 a 10 focolari, a seconda delle dimensioni del forno, la fiamma entra nel forno ed arriva alla volta e da questa

viene rinviata alla suola e per canali che si trovano al disotto di essa e nello spessore delle pareti passa al piano superiore, che serve da forno di biscotto, e da questo va al camino.

La capacità di questi forni è di 50÷60 Qli di merce.

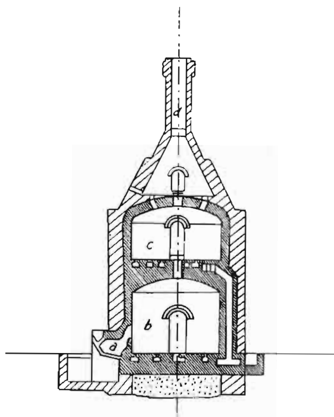
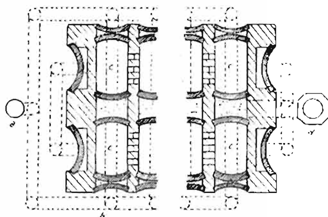


Fig. 15.
Forno intermittente a fiamma rovesciata.
a) focolaio - *b*) laboratorio - *c*) fornarciotto - *d*) camino

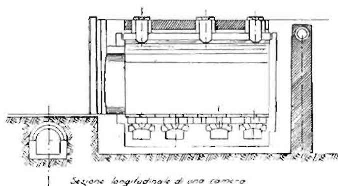
La fig. 16 mostra un forno a camere a gas. Il gas arriva dal gassogeno entra nella camera di cottura dove a contatto dell'aria immessa da apposite bocche s'incendia e la fiamma riverberata dalla volta torna alla suola e di qui attraverso apposite tubazioni va al camino.

In genere questi tipi di forni sono composti di 20÷24 camere

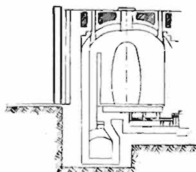


Pianta del forno a camere a gas

a) gassogeno - b) condotti del gas - c) camere di cottura - d) camino.



Sezione longitudinale di una camera



Sezione trasversale

Fig. 16.
Forno a camere.

in modo che è possibile sfruttare il calore di ricupero della camera in cui si è fatta la cottura, durante il raffreddamento di questa, per preriscaldare la camera vicina in cui si farà avvenire la successiva cottura. Con questo tipo di forno è possibile lavorare con continuità, poichè dato il numero delle camere si può procedere al lavoro di carico e scarico lontano dalla camera in cottura ed il fuoco si fa circolare da una camera all'altra.

Il volume di ciascuna camera è di circa 20 mc.

Durante il processo di cottura avvengono numerose trasformazioni e reazioni complesse chimiche e fisiche nella porcellana.

In primo luogo alle temperature più basse (100 ÷ 200 °C) avviene l'eliminazione dell'acqua igroscopica.

Intorno ai 400 °C le materie organiche vengono private dei loro elementi volatili.

Dai 400 ai 600 °C si elimina l'acqua di combinazione.

A circa 600 °C avviene l'ossidazione del carbonio e delle sostanze organiche che cominciano a bruciare combinandosi con l'aria del forno.

A 700 °C l'impasto è costituito da una miscela di silice libera, di silice cristallina, di allumina, di carbonati e parecchi silicati includenti feldspato e materiali analoghi.

Al disopra dei 700 °C gli alcali e gli ossidi incominciano ad unirsi con la silice libera per formare vari silicati.

A 780 °C circa i carbonati incominciano a decomporsi, il CO_2 è portato via e le basi sono messe in libertà e si formano nuovi silicati più complessi tra i 900 e i 1200 °C.

Al disopra di questa temperatura si ha la vetrificazione dell'impasto; infatti si ha la fusione del feldspato e degli altri fondenti, la trasformazione della silice cristallina (quarzo) nelle forme allotropiche più leggere (tridimite e cristobalite) ed alla temperatura di 1380 ÷ 1450 °C, che è la temperatura di cottura della porcellana dura, si ha la trasformazione parziale della caolinite ($Al_2O_3\,2SiO_2\,2H_2O$) in mullite microcristallina ($3Al_2O_3\,2SiO_2$) di modo che la massa si presenta come una struttura di questo materiale riempita di quarzo e feldspato fuso.

Per la misura delle temperature servono i pirometri a coppia termoelettrica Pt-Pt Rh ed i coni Seger. Questi ultimi sono dei conetti

di tre-quattro cm. di altezza, composti di pasta speciale ed hanno la proprietà di fondere a temperature ben determinate. Così ad es. per la cottura della porcellana dura servono i coni 13, 14, 15 e 16 corrispondenti a temperature di fusione di 1380, 1410, 1435 e 1460 °C.

La fig. 17 mostra la curva di cottura dei forni intermittenti.

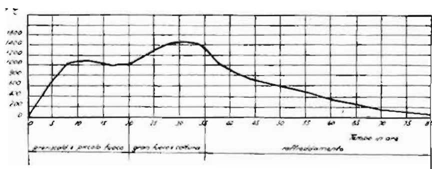


Fig. 17.
Diagramma di cottura dei forni intermittenti.

Montaggio.

Dal forno gli isolatori ormai cotti e ricoperti di uno strato lucente di vetrina passano alla Sala Scelta dove vien fatta una selezione a vista e quelli che presentano difetti vengono scartati; gli altri passano alla Sala Prova per la selezione elettrica e da qui alla spedizione od alla Sala Montaggio a seconda dei tipi.

Al montaggio passano gli isolatori rigidi in più pezzi che devono essere uniti fra loro con cemento e gli isolatori che vanno montati con parti metalliche (cappa e perno per gli isolatori a sospensione, base o tassello e cappa per quelli per cabina e sezionatori per interno per medie tensioni, flangie e cappe per quelli per sezionatori per sottostazioni all'aperto per alta tensione.) L'operazione di montaggio è di fondamentale importanza e va eseguita con tutti gli accorgimenti del caso onde poter soddisfare ai requisiti richiesti e poter assumere le garanzie meccaniche inerenti.

Passiamo in rassegna il montaggio dei vari tipi di isolatori riservandoci di trattare a fondo lo sviluppo di ciascun tipo in particolare.

Isolatori rigidi in più pezzi. — Possono essere in due o più pezzi, di tipo normalizzato oppure di tipo speciale costruiti da ciascuna fabbrica su disegno proprio. Indipendentemente da questo il loro montaggio è identico. Esso avviene in maniera abbastanza semplice. In primo luogo le parti che devono essere cementate e che sono naturalmente prive di smalto, vengono spalmate con una vernice al catrame che ha lo scopo di costituire un velo elastico per le possibili dilatazioni del cemento. Essiccata la vernice, il pezzo superiore viene messo su un tornietto verticale a mano in un sostegno di gesso o di legno atto a riceverlo. Nella concavità di questo pezzo viene distribuito il cemento opportunamente smagrato e sopra va pigiata la convessità corrispondente del secondo pezzo che va cementato insieme al primo. Lo scopo del tornietto è per vedere se i pezzi montati sono perfettamente assiali tra loro. Dopo il montaggio gli isolatori vengono messi a stagionare per la presa del cemento.

La fig. 18 mostra alcuni tipi di isolatori in più pezzi cementati.

Isolatori a sospensione. — Il montaggio degli isolatori a sospensione è vario a seconda dei tipi costruiti dalle diverse fabbriche. Lo scopo che si vuol raggiungere è quello di fissare alla parte isolante di porcellana degli organi d'attacco che permettano di sottoporre l'isolatore ad un considerevole carico meccanico nelle migliori condizioni di resistenza per il materiale.

Noi accenneremo ai tipi principali attualmente usati.

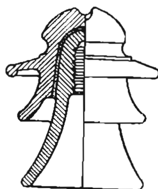
Nei riguardi del loro montaggio gli isolatori a sospensione possono essere:

1) A cappa e perno cementati;
2) A cappa cementata e perno fissato con lega metallica;
3) A cappa e perno fissati con lega metallica;
4) A cappa cementata e perno « testa a cono ».

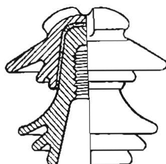
Le cappe cementate vengono montate con cemento ad alta resistenza opportunamente smagrato e precisamente viene distribuito il cemento nella cappa che poi viene incappucciata sull'isolatore.

Onde evitare che si esercitino sforzi sul piatto dell'isolatore per effetto delle dilatazioni, la cappa viene mantenuta staccata da esso di 3 ÷ 4 mm.

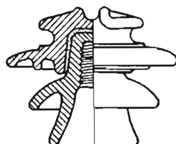
Per le cappe montate con lega si procede a colare la lega Pb -Sb nella cappa attraverso opportuni fori praticati in essa; la testa dell'iso-

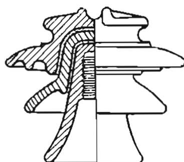


Tipo Delta



Tipo Paderno





Tipi a Campana Larga

Fig. 18.

latore presenta poi una scanalatura atta a ricevere detta lega che, indurendosi, viene a collegare la cappa con la porcellana (fig. 19).

Per impedire la fuoruscita della lega nella parte inferiore e nello stesso tempo per tenere la cappa staccata dal piatto si montano degli anelli di amianto.

Le cappe sono di ghisa malleabile e sono munite di organi di attacco ad orbita universale normalizzata (fig. 20).

Per usi speciali, come ad esempio per trazione, le cappe possono

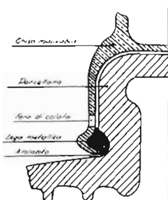


Fig. 19.

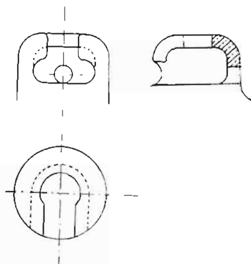


Fig. 20

essere con attacco a forchetta e spinotto (fig. 21). Il perno nel primo caso è a batocchio e nel secondo ad occhiello (fig. 22).

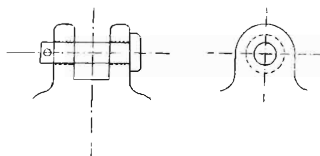


Fig. 21

Mentre la cappa abbraccia esternamente la testa dell'isolatore, il perno viene fissato internamente alla testa in una camera di forma opportuna in essa ricavata, di modo che tra i due organi d'attacco resta uno strato di isolante. Come abbiamo già detto i sistemi di fissaggio possono essere o con cemento o con lega.

Per il sistema a cemento si introduce il perno nella camera che

viene poi riempita di cemento e questo viene lasciato stagionare fino a che sia avvenuta la presa.

Per il sistema a lega, insieme col perno vengono introdotti nella camera dei corpi che annegati poi nella lega impediscano la fuoruscita del perno. Le camere hanno una forma tale, diversa per ogni tipo, che lo sforzo applicato al perno venga a trasmettersi alla porcellana sotto

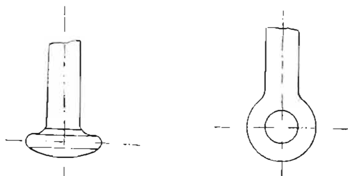


Fig. 22

forma di sforzo di compressione, esercitato tra la testa del perno e la cappa esterna.

Lo scopo di impedire l'uscita del perno dalla camera può essere ottenuto con:

1) Sfere di ferro;
2) Segmenti di metallo duro;
3) 2 molle d'acciaio a spirale, sovrapposte

o con sistemi analoghi.

Nel primo caso i perni vengono introdotti nella camera e vengono poi immesse 11 sfere che si dispongono ad anello sull'apposita sede conica della testa del perno e su queste viene colata la lega (fig. 23).

Nel secondo e terzo caso si procede come per il precedente, solo che invece delle sferette vengono introdotti, in uno, tre segmenti di metallo duro di forma appropriata che vengono tenuti a posto da un anellino di gomma fino al colaggio della lega: nell'altro due molle d'acciaio a spirale che vengono anch'esse annegate nella lega (figure 24-25).

Caratteristico è il sistema di montaggio col perno « testa a cono ». Questo perno (brevetto Smith) è composto da un cono che presenta una gola ed un gambo e da un perno speciale a testa lavorata, divisa

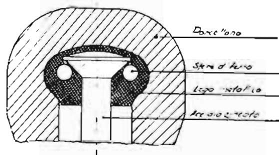


Fig. 23.

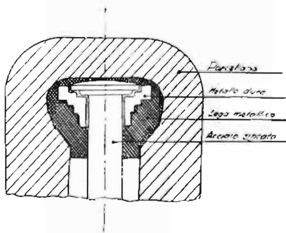


Fig. 24.

in sei segmenti, con foro d'invito per il gambo del cono, nel quale foro sono ricavati sei denti (uno per segmento) (fig. 26).

Per il suo montaggio si procede nel modo seguente:

Nella camera dell'isolatore vengono messe delle guarnizioni di tela, di amianto e di acciaio, in ordine, a forma di semianelli che si

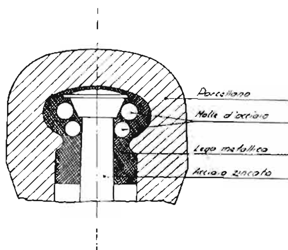

Porcellana
Molle d'acciaio
Lega metallica
Acciaio zincato

Fig. 25.

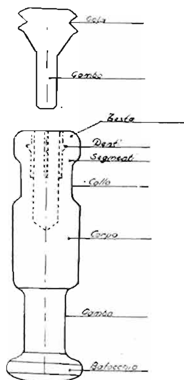

Gambo
Testa
Denti
Segmenti
Collo
Corpo
Gamba
Batocchio

Fig. 26

dispongono sul lato conico della camera. Esse formano un cuscinetto d'appoggio ai segmenti del perno a montaggio avvenuto e servono per la distribuzione degli sforzi. Per mezzo di una saldatrice elettrica a ganasce di rame raffreddate ad acqua si riscalda il collo del perno al calor rosso e nello stesso tempo si imbocca il gambo del cono nel foro d'invito; il tutto viene messo nella camera dell'isolatore che è posto sul banco di una pressa a mano a stella, a corsa regolata con comando a dentiera e a biella e contrappeso. Un colpo di pressa fa sì che la testa del perno divisa in sei segmenti si allarghi sulle generatrici del cono finchè i denti arrivino ad agganciarsi sulla gola di questo formando un tutto unico ed indissolubile. (fig. 27).

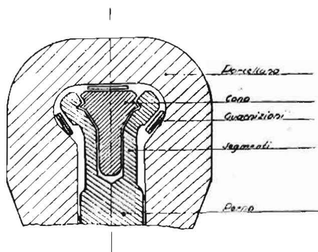


Fig. 27.

Isolatori portanti per sezionatori per interno. — Vengono montanti o con tassello e cappa, (fig. 28) o con base e cappa (fig. 29).

Gli isolatori devono presentare alla base e sulla testa, dopo montaggio delle superfici perfettamente piane e parallele. Per raggiungere questo scopo si usano macchine a piani paralleli distanziabili fra loro a seconda dell'altezza degli isolatori da montare.

Un sistema più moderno è la macchina semplice ideata e fatta

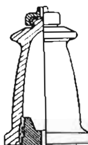


Fig. 28.

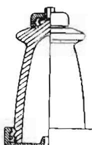


Fig. 29.

costruire da chi scrive che permette di montare tre pezzi alla volta consentendone pure la finitura in posto. (fig. 30).

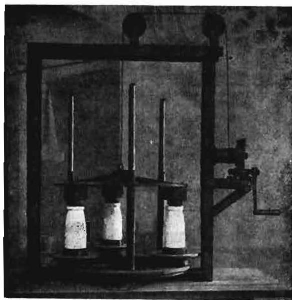


Fig 30.
Macchina per il montaggio di isolatori portanti.

Essa consiste in un'incastellatura con un piano di base; su di essa appoggia una piastra che può ruotare per mezzo di sfere; su questa piastra sono fissate tre basi minori che possono ruotare su cuscinetti a sfere e tre aste su cui vengono infilati i tubi distanziatori per le altezze e

che servono pure di guida alla piastra di copertura sulla quale sono fissate altre tre basi in corrispondenza di quelle sulla piastra di base, pure girevoli su cuscinetti a sfere.

La piastra superiore è attaccata ad una fune metallica con uno snodo. Un rullo per avvolgere la fune ed un comando ad ingranaggi e manovella fissati sul fianco dell'incastellatura permettono il sollevamento e l'abbassamento della piastra.

Il montaggio degli isolatori avviene nel modo seguente:

Si distribuisce il cemento nelle parti metalliche e queste vengono messe sull'isolatore; il tutto è posto sulla macchina a piastra superiore alzata; girando la piastra di base si presenta all'operatore una nuova base su cui viene messo il secondo isolatore e così via. Quando i tre isolatori sono posti sulla macchina si cala la piastra superiore e siccome le tre basi superiori sono in corrispondenza di quelle inferiori e presentano un foro d'invito per il niples della cappa, si adagiano sulle cappe comprimendo il cemento e fissando i piani paralleli. Dopo di ciò si procede alla pulitura del cemento fuoruscito dalle parti metalliche per effetto della compressione esercitata, facendo ruotare ogni singolo isolatore sui suoi sostegni a sfere e togliendo il cemento superfluo con una stecca di legno e con una spugna. Finita la pulitura si solleva la piastra superiore e si tolgono dalla macchina gli isolatori che vengono posti a stagionare.

Isolatori portanti per sezionatori per esterno. — Sono montati con due flangie o con flangia e cappa cementate che devono presentare superfici perfettamente piane e parallele per permettere il montaggio in colonna. (fig. 31).

Le parti metalliche sono montate con macchine semplici con due piani paralleli tra loro. Sul piano di base sono fissate tre aste su cui vengono infilati tre tubi distanziatori per le altezze; il piano superiore viene infilato pure sulle tre aste ed è spostabile a seconda dell'altezza voluta. Le flangie da montare vengono fissate con bulloni alle piastre inferiore e superiore, in esse viene distribuito il cemento e l'isolatore è posto sulla macchina dove viene poi infilata la piastra superiore insieme alla seconda flangia ad essa fissata. Dopo la pulitura del

cemento esuberante, l'isolatore è lasciato per un giorno sulla macchina poi ne viene tolto ed è posto a compiere la stagionatura completa.

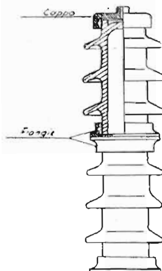


Fig. 31.

Lavoro di rettifica.

Molti isolatori e specialmente gli isolatori passanti devono subire un lavoro meccanico di rettifica, sia per ottenere delle basi perfettamente piane, parallele tra loro e normali all'asse, per ragioni di tenuta o dell'olio per passanti per apparecchiature elettriche o del vapore per passanti per caldaie elettriche, sia per ottenere delle dimensioni vincolate da tolleranze minime che si possono raggiungere solo lavorando il pezzo in cotto.

Servono a questo scopo, per isolatori di dimensioni non grandi, dei comuni torni meccanici su cui è montato al posto dell'utensile una mola di carborundum. In genere si piazza sul carro del tornio una comune rettifica portatile con contralbero che permette due o più velocità con un grande numero di giri (da 4000 a 12000 giri al 1') (fig. 32).

Per grossi isolatori servono robusti torni verticali accoppiati ad una colonna che porta una mensola porta rettifica con comando oriz-

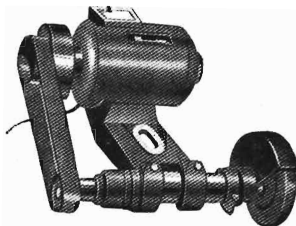


Fig. 32.
Rettifica elettrica portatile.

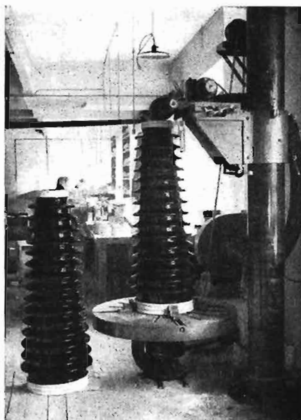


Fig. 33.
Isolatori passanti per esterno in fase di rettifica.

zontale e verticale per i piccoli spostamenti e scorrimento di tutta la mensola sulla colonna per mezzo di contrappeso e relativo bloccaggio, per i grandi spostamenti. La rettifica è dello stesso tipo di quella vista più sopra.

Con questa macchina si possono lavorare isolatori di grandi dimensioni (fino oltre due metri di altezza ed un metro di diametro) e di peso rilevante (fino a 200 Kg.)

La fig. 33 mostra degli isolatori passanti per esterno in fase di rettifica, con un tornio verticale a colonna pure ideato e fatto costruire da chi scrive.

CAPITOLO V

CLASSIFICAZIONE DEGLI ISOLATORI

Vari sono i tipi di isolatori che servono per i diversi usi, sia per linee elettriche di trasporto d'energia, sia per cabine di trasformazione, sia per apparecchiature varie.

Nella nostra classificazione prescindiamo da tutto ciò che è materiale stampato e che serve in genere per impianti interni per abitazioni (interruttori, valvole, scatole di derivazione, ecc.) per trattare solo degli isolatori di linea, e per apparecchiature elettriche.

Classificazione secondo la tensione d'esercizio.

Dal punto di vista della tensione d'esercizio gli isolatori si possono dividere in tre grandi classi.

1)	Isolatori	per	bassa	tensione	per tensioni	fino a	1000	V.
2)	»	»	media	tensione	»	» »	15000	V.
3)	»	»	alta	»	»	» oltre i	15000	V.

Classificazione secondo l'impiego ed il tipo.

Nell'ambito di ciascuna classe di cui sopra si possono fare delle suddivisioni in base agli usi a cui servono, così avremo:

1) Isolatori di linea semplici e montati
2) » passanti per interno e per esterno
3) » portanti » » » » »
4) » da quadro
5) » speciali

Prendiamo in considerazione quest'ultima classificazione e passiamo in rassegna i principali tipi che appartengono a ciascuna di esse.

A) Isolatori di linea. — Tra gli isolatori di linea possiamo distinguere:

Isolatori telefonici normali (fig. 34);
» » serie a gola larga (fig. 35);
» » » » » » tipo rinforzato (fig. 36);
» per tiranti (a noce, ad orecchie ecc.) (fig. 37);
» a rocchetto ed a carrucola (fig. 38);
» a naso e a cresta (fig. 39);
» per calate (fig. 40);
» d'entrata (fig. 41);
» a pipa (fig. 42);
» di linea rigidi serie delta (fig. 43);
» » » » » paderno (fig. 44);
» » » » » a testa rigata (fig. 45);
» » » » » a gola ed a campana larga (fig. 46);
» a sospensione a cappa e perno (fig. 47);

B) Isolatori passanti. — Tra gli isolatori passanti possiamo distinguere:

Isolatori passamuro per interno (fig. 48);
» » per esterno (fig. 49);
» passanti per interno (fig. 50);
» » per esterno (fig. 51);

C) Isolatori portanti. — Tra gli isolatori portanti possiamo distinguere:

Isolatori portanti a gole (fig. 52);
Isolatori portanti a tassello per interno (fig. 53);
» » a base per interno (fig. 54);
» » » » » » serie rinforzata (fig. 55);
» » per esterno (fig. 56);
» » » » per apparecchiature (fig. 57).

D) Isolatori da quadro.

Isolatori a manopola (fig. 58);

» a maniglia (fig. 59);

E) Isolatori speciali.

Isolatori antisale (fig. 96);

» antinebbia (fig. 97-98);

» a bastone (fig. 93-94);

ecc.

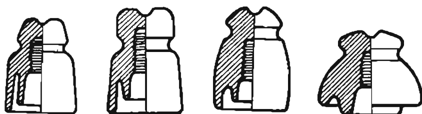


Fig. 34.
Isolatori telefonici normali

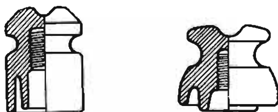


Fig. 35
Isolatori telefonici « serie a gola larga »

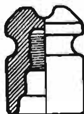


Fig. 36.
Isolatori telefonici tipo rinforzato.

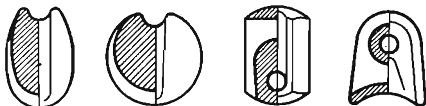


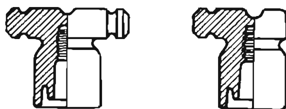
Fig. 37.
Isolatori per tiranti.



Fig. 38.
Isolatori a base ed a carrucola.



Isolatori a cresta.



Isolatori a naso
Fig. 39.

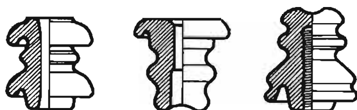


Fig. 40.
Isolatori per calate e per amarraggio.

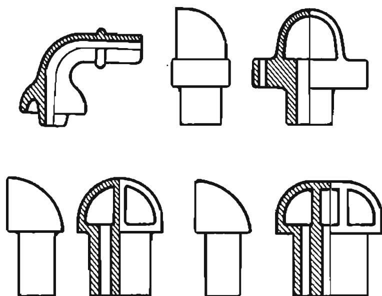


Fig. 41.
Isolatori d'entrata.

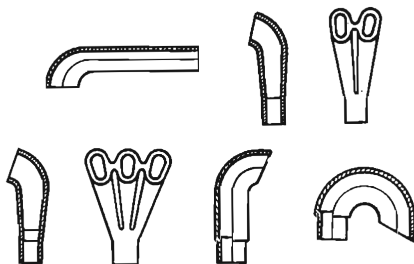


Fig. 42.
Isolatori a pipa.

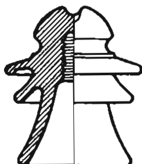


Fig. 43.
Isolatore di linea « Serie Delta ».

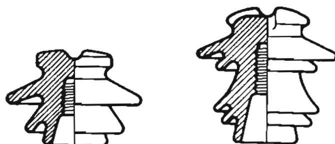


Fig. 44.
Isolatori di linea « Serie Paderno ».

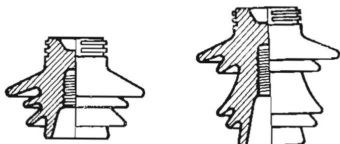


Fig. 45.
Isolatori « Serie a testa rigata ».

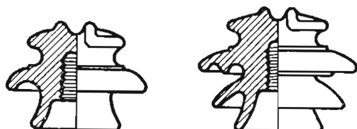


Fig. 46.
Isolatori di linea « Serie a campana larga ».

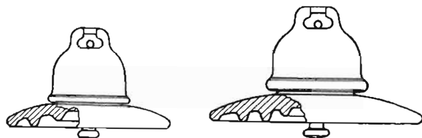


Fig. 47.
Isolatori a sospensione a cappa e perno



Fig. 48.
Isolatore passamuro per interno.

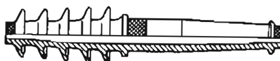


Fig. 49.
Isolatore passamuro per esterno.

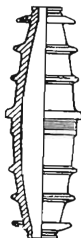


Fig. 50.
Isolatore passante per interno.

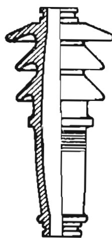


Fig. 51.
Isolatore passante per esterno.

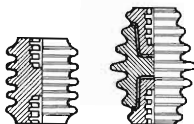


Fig. 52.
Isolatori portanti a gole.

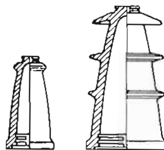


Fig. 53.
Isolatori portanti a tassello per interno.

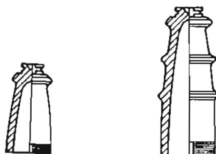


Fig. 54.
Isolatori portanti a base per interno.

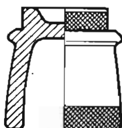


Fig. 55.
Isolatore portante a base « Serie rinforzata ».



Fig. 56.
Isolatori portanti per esterno.

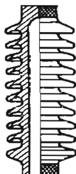


Fig. 57.
Isolatore portante per esterno di forma americana

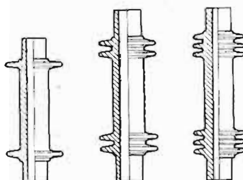


Fig. 58.
Isolatori a manopola.

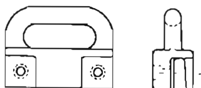


Fig. 59.
Isolatori a maniglia

Isolatori normalizzati e non normalizzati.

La maggior parte degli isolatori sopra elencati è normalizzata, cioè le varie fabbriche costruiscono isolatori sullo stesso disegno per i vari tipi delle stesse caratteristiche, con l'enorme vantaggio dell'intercambiabilità tra gli stessi tipi costruiti dai vari fabbricanti.

Tra i tipi non normalizzati sono da notarsi:

A) Gli isolatori rigidi per alta tensione, di grandi dimensioni, per il fatto che in generale sono stati sostituiti dai tipi a sospensione e la loro fabbricazione è abbastanza limitata e cioè alle sostituzioni che necessitano ad alcune Società Elettriche che li hanno ancora in servizio, sia come isolatori di linea, sia come portanti montati in colonna per sottostazioni all'aperto.

B) Gli isolatori a sospensione; ciò è comprensibile per il fatto che essendo composti di porcellana, come isolante, e da parti metalliche, come organi d'attacco, ciascun fabbricante lavora su disegno proprio per ottenere un montaggio adeguato alle garanzie che si assume. Però anche in questi tipi c'è una corrispondenza per quanto riguarda le dimensioni ed i carichi elettrici e meccanici, restando diverso in via di massima solo il sistema di montaggio, per cui si possono considerare quasi tipi normalizzati.

C) Gli isolatori speciali antisale, antinebbia, ecc. per il fatto che questi tipi di isolatori pur essendo già impiegati su larga scala sono ancora in fase sperimentale, poichè pur presentando innumerevoli vantaggi nei confronti dei tipi normali sono ancora allo studio circa la forma delle campane, i diametri e le distanze delle campane stesse per avere il miglior rendimento.

D) Gli isolatori a bastone, poichè pur presentando numerosi vantaggi dal punto di vista elettrico, non sono ancora entrati nella pratica corrente per altri motivi come la novità del sistema, la non intercambiabilità con tipi per tensioni diverse, essendo questi tipi fabbricati in un sol pezzo ciascuno per una tensione ben determinata, il fatto di lavorare la porcellana a trazione invece che a compressione con

carichi che perciò possono subire variazioni sensibili da un isolatore all'altro pur dello stesso tipo.

E) Molti tipi di isolatori passanti, sia per tensioni elevatissime sia anche per medie tensioni per il fatto che ciascun costruttore di apparecchiature preferisce montare isolatori costruiti su disegno proprio.

F) Molti altri tipi di isolatori per usi speciali fatti costruire su disegno proprio da parte dei vari commissionari.

È auspicabile che per molti dei tipi sopra elencati si possa venire presto ad una normalizzazione sia nell'interesse di chi deve usare detti isolatori, sia per la maggior speditezza di lavoro nelle fabbriche, per la riduzione conseguente dei tipi da fabbricare che porta all'abbreviazione dei termini di consegna, anche perchè in molti casi le differenze tra tipo e tipo sono minime e si può con un po' di buona volontà da parte dei costruttori di apparecchiature arrivare all'impiego di un numero di tipi molto più ridotto.

CAPITOLO VI

CARATTERISTICHE DEI VARI TIPI DI ISOLATORI

Passeremo rapidamente in rassegna i vari tipi di isolatori sopra elencati, dal punto di vista della loro conformazione e dell'uso a cui vengono adibiti, riservandoci di trattare ampliamente nella seconda parte gli isolatori per alta tensione e gli isolatori speciali sia di linea che per apparecchiature.

Isolatori di linea.

Isolatori telefonici (figg. 34-35-36). — Sono i normali isolatori che vengono impiegati sia per linee telefoniche e telegrafiche, sia per distribuzione di energia elettrica a bassa tensione. Il loro impiego è limitato, per i tipi di maggiori dimensioni, alla tensione di 500 V.

Dal punto di vista meccanico, per la loro conformazione, hanno un'ottima resistenza alla flessione.

Elettricamente per questi tipi interessa di più la resistività superficiale e la resistività di massa che non la tensione d'arco, date le basse tensioni per cui vengono impiegati.

Isolatori per tiranti, a rocchetto e a carrucola (figg. 37-38). I primi vengono usati come complementi nelle linee di bassa tensione specie per gli ancoraggi, data la loro grande resistenza meccanica poichè la porcellana lavora a compressione.

Gli altri vengono usati in genere per impianti interni per fili coperti.

Isolatori a naso, a cresta, per calate, d'entrata, a pipa (figure 39-40-41-42). — Servono in genere per le discese, l'entrata e l'uscita dalle cabine di distribuzione.

Isolatori rigidi. — I tipi normalizzati comprendono le tre serie seguenti e servono per le medie tensioni se in un sol pezzo e per le alte tensioni se in più pezzi uniti dopo cottura con cemento.

Come abbiamo già detto più sopra, per le alte tensioni si fabbricano anche dei tipi non normalizzati.

a) *Isolatori serie Delta.* — Questi tipi di isolatori oltre al fatto di presentare il massimo di sicurezza contro le scariche superficiali sono studiati in modo da presentare le più favorevoli condizioni di resistenza meccanica. Perciò essi sono fatti in modo che la gola si trova più bassa dell'estremità superiore del perno, cosicchè la porcellana deve sopportare solo uno sforzo di compressione e non di flessione. Per conseguenza questi isolatori vengono ad avere una forma alta e slanciata (fig. 43).

Si arriva in questa maniera a dare agli isolatori a perno una resistenza meccanica tale da rendere pressochè impossibile la rottura per flessione dell'isolatore. Infatti anche impiegando perni più robusti di quelli previsti normalmente per questi tipi di isolatori, si arriva sempre a piegare il perno ma non a danneggiare la porcellana.

b) *Isolatori serie Paderno e isolatori a testa rigata.* — Queste serie differiscono dalla precedente che abbiamo considerato per il fatto di presentare un profilo caratteristico e cioè una serie di campane abbastanza numerosa, vicine tra loro e di differente diametro (figure 44-45).

Dal punto di vista meccanico si avvicinano moltissimo ai tipi della serie seguente, presentando le stesse caratteristiche nei confronti della posizione della testa del perno rispetto alla gola dell'isolatore e della robustezza.

c) *Isolatori serie a campana larga* (fig. 46). — Questa serie di isolatori è stata creata in America e differisce perciò dai tipi sopra considerati, sia per concezione sia per la forma.

Questi tipi presentano una forma più bassa e più larga; lo spessore della porcellana è maggiore che nei tipi precedenti, di modo che per isolatori aventi le stesse caratteristiche il peso di questi ultimi risulta più elevato.

La ragione di queste caratteristiche è data da due fattori:

1) L'isolatore a campana larga è soggetto ad una flessione pronunciata dato che la gola dell'isolatore si trova in posizione sensibilmente più alta dell'estremità superiore del perno.

2) Questo tipo di isolatore essendo stato studiato in America è stato progettato in base alle caratteristiche della porcellana americana che ha una temperatura di cottura relativamente bassa per l'impiego di fondenti, per cui gli spessori dell'isolatore devono essere più grandi per poter rispondere alle condizioni richieste per la perforazione, in maniera che venga sempre a verificarsi una scarica superficiale e non mai una perforazione.

Nel complesso questi isolatori sono robustissimi e la loro forma si è imposta anche sui mercati europei, per cui vengono usati indifferentemente con gli altri tipi, ed hanno sempre avuto un ottimo comportamento.

Una variante di questi tipi è data dalla serie a campana larga ed a gola larga che si presta molto bene per il montaggio delle linee con filo in alluminio e che ha avuto una larghissima diffusione in questi ultimi anni.

Isolatori a sospensione (fig. 47). — La caratteristica di questi isolatori è di poter essere uniti a formare catene di vari elementi per tutte le tensioni d'esercizio che possono interessare.

Dal punto di vista meccanico la loro conformazione è tale che lavorando la porcellana a compressione ed essendo gli organi di attacco di materiale assai resistente (acciaio e ghisa malleabile) essi possono sopportare sforzi meccanici rilevanti, che vengono ad essere ancor più esaltati dal fatto che il carico massimo di servizio che vien loro richiesto in condizioni normali è limitatissimo nei confronti della loro resistenza sia al carico critico che alla rottura completa. (Kg. 1500 ÷ 1800 di servizio contro carichi di rottura di Kg. 7000 ÷ 8000 e più).

Dal punto di vista elettrico, la loro forma a piatto leggermente convesso nella parte superiore e con alette nella parte inferiore permette nel montaggio in sospensione normale di mantenere asciutta, in caso di pioggia, tutta la parte inferiore, poichè l'acqua dopo aver

lambito la parte superiore sgocciola al bordo; le alette inferiori accrescono inoltre il percorso della scarica.

Nel caso di montaggio in amarraggio, cioè in posizione pressochè orizzontale, il comportamento non è ideale poichè gli isolatori vengono ad essere quasi completamente bagnati dalla pioggia, ma si sopperisce al diminuito isolamento con l'aggiunta di qualche elemento alla catena.

Norme di massima per la composizione di catene formate da isolatori normali, cioè delle dimensioni normalmente usate per linee ad alta tensione, sono date dalle formule empiriche seguenti:

$$\text{Numero degli elementi in sospensione} = \frac{KV}{15} + 1$$

$$\text{Numero degli elementi in amarraggio} = \frac{KV}{15} + 2$$

KV = tensione in KV-efficaci.

Isolatori passanti.

Isolatori passamuro per interno. — Sono dei comuni passanti a tubo, rastremati partendo dal centro verso le estremità (fig. 48) e servono per il passaggio dei fili attraverso muri interni.

Vengono fissati al muro per mezzo di una flangia montata eccentricamente sull'isolatore in maniera tale da lasciar libero da contatto tutto il resto dell'isolatore nella finestra praticata nel muro (fig. 60).

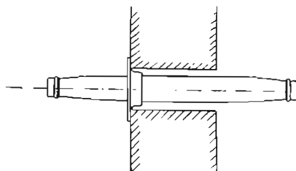


Fig. 60.

Isolatori passamuro per esterno. — Si differenziano dai precedenti per avere delle campane, in numero vario a seconda delle tensioni per cui sono costruiti, dalla parte che rimane all'esterno soggetta alla pioggia; differiscono inoltre dai comuni passanti per esterno per la loro lunghezza maggiore. Anch'essi vengono fissati al muro per mezzo di una flangia montata nella zona apposita dell'isolatore che delimita la parte che va all'interno da quella che va all'esterno (fig. 61).

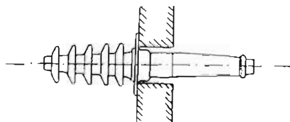


Fig. 61.

Isolatori passanti per interno. — Sono degli isolatori che non differiscono molto dagli isolatori passamuro per interno; sono più corti, di diametro maggiore; a seconda delle tensioni per cui sono costruiti possono avere delle piccole alette oppure no (fig. 50). Servono per trasformatori, interruttori in olio, ecc.

Isolatori passanti per esterno. — Sono muniti di campane verso un'estremità e si differenziano dai passamuro per esterno solo per le loro dimensioni, come abbiamo già detto.

Possono essere in un sol pezzo (per tensioni limitate) di cui una parte va in olio e l'altra resta esterna al trasformatore, (fig. 51) oppure in due pezzi separati (per elevatissime tensioni — passanti montati a condensatore, ecc.) di cui una parte a campane resta esterna al trasformatore e la parte inferiore a gole o nervature va in olio (fig. 62). Le due parti vengono montate insieme con una flangia.

Isolatori passanti speciali per caldaie elettriche. — Data l'importanza che vanno assumendo ci sembra opportuno accennare anche a questi tipi.

Sono isolatori di forma speciale, in genere composti da un tubo

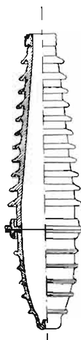


Fig. 62.

cilindrico che passa in un altro isolatore più corto a base che serve per la tenuta, oppure sono isolatori cilindrici o a doppio tronco di cono con una flangia per la tenuta (fig. 63).

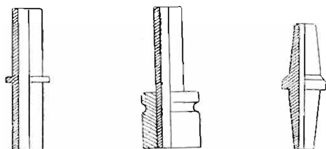


Fig 63.

Isolatori portanti.

Isolatori portanti a gole. — Possono essere in un sol pezzo oppure in tre pezzi a seconda delle dimensioni e delle tensioni per cui sono costruiti (fig. 52). Servono nelle cabine di distribuzione, per linee interne, per sbarre di cabina e per quadri di manovra.

Isolatori portanti per interno a base e a tassello. — Differiscono tra loro solo per la conformazione della parte inferiore, che può essere fatta per ricevere una base metallica cementata esternamente o un tassello cementato internamente. La forma di questi isolatori portanti è del tipo rastremato verso la testa e sono muniti di alette oppure no a seconda delle tensioni per cui sono costruiti (figg. 53-54). Nella parte superiore, per entrambi i tipi, viene montata una cappa metallica munita di niples.

Servono per linee interne, per quadri di manovra e per sezionatori interni.

Nella stessa categoria vi è la serie rinforzata a base che differisce dalle precedenti solo per i diametri e gli spessori (fig. 55).

Isolatori portanti per esterno e per apparecchiature. — Sono gli isolatori che servono nelle sottostazioni sia per gli arrivi delle linee elettriche, sia per i sezionatori.

Sono isolatori a più campane di forma cilindrica (figg. 56-57).

Possono essere montati con flangie cementate alle due estremità oppure con una flangia ed una cappa per l'elemento di testa nelle colonne; in genere servono messi in colonna uno sull'altro, con ombrelli di lamiera interposti per la protezione dalla pioggia, per raggiungere la sicurezza delle tensioni d'esercizio che devono sopportare.

Isolatori da quadro.

Sotto questa definizione ricordiamo le valvole a manopola ed a maniglia che vengono poste sui quadri di manovra dopo i coltelli sezionatori (figg. 58-59).

Vengono fabbricate di diverse dimensioni e sono usate per basse e medie tensioni a seconda delle loro dimensioni.

Nel tipo a manopola (fig. 58) vengono montate alle due estremità dei collari con propaggini che vengono poi fissate al quadro per mezzo di contatti a molla posti su questo; il filo che fa da valvola è posto nell'interno dell'isolatore ed è fissato ai due collari di estremità.

Nel tipo a maniglia (fig. 59) il filo è fissato nella scanalatura tra le due pareti di porcellana che formano il corpo dell'isolatore; alle estremità vengono montati dei contatti metallici ed il tutto viene fissato in una feritoia praticata sul quadro con contatti atti a riceverla.

Il nome le deriva dall'impugnatura che serve per fissarla od estrarla dalla sua sede.

Isolatori speciali.

Con questa definizione intendiamo elencare tutti i tipi di isolatori che per la loro conformazione o per il compito speciale che sono chiamati ad assolvere, si distinguono dai comuni tipi di isolatori.

Ricordiamo solo i tipi principali che sono gli isolatori a bastone, gli isolatori antisale e gli isolatori antinebbia.

Di questi tratteremo ampliamente nella seconda parte.

PARTE SECONDA

ISOLATORI PER ALTA TENSIONE

CAPITOLO VII

ISOLATORI RIGIDI PER ALTA TENSIONE IN PIÙ PEZZI CEMENTATI

Con lo svilupparsi delle tensioni e per ottenere valori di scarica abbastanza elevati è stato necessario dare agli isolatori rigidi delle dimensioni tali che la loro fabbricazione in un sol pezzo diveniva impossibile.

Inoltre, come abbiamo già visto, la resistenza disruptiva della porcellana non aumenta proporzionalmente allo spessore, ma anzi a partire da uno spessore di circa 25 mm. l'aumento di spessore non accresce che pochissimo la resistenza alla perforazione in rapporto all'aumento stesso.

Per questa ragione e per ragioni di ordine tecnico inerente alla fabbricazione si è arrivati a dividere gli isolatori rigidi per alta tensione in più pezzi cotti separatamente ed uniti dopo cottura con cemento.

In questo modo i pezzi vengono provati separatamente e ci si può rendere conto che ogni singolo pezzo è esente da difetti di fabbricazione.

Poichè la tensione d'arco dell'isolatore montato è inferiore alla somma delle tensioni di scarica superficiale dei singoli pezzi, un tale isolatore di cui le singole parti sono state provate fino alla scarica superficiale, offre una garanzia grandissima alla perforazione.

Inoltre un tal tipo di isolatore presenta una sicurezza particolare per il fatto che se anche una parte per cause meccaniche od elettriche perde il suo potere isolante, non si produce necessariamente la perforazione di tutto l'isolatore.

I numerosi vantaggi presentati dagli isolatori composti hanno spinto le varie fabbriche a costruire isolatori in più pezzi uniti insieme dopo la cottura.

Gli isolatori cementati, naturalmente non presentano vantaggi sensibili che a partire da una certa grandezza; ed infatti una suddivisione degli spessori di porcellana non aumenta la resistenza disruptiva negli isolatori relativamente piccoli e di spessore medio.

Inconvenienti riscontrati sugli isolatori in più pezzi cementati.

Nelle riviste tecniche di tutti i paesi si è frequentemente parlato dei difetti degli isolatori rigidi per linee ad alta tensione. I difetti lamentati si verificavano di preferenza su linee aeree per tensioni di esercizio tra i 15 e i 40 KV., su linee cioè dove erano montati isolatori rigidi in più pezzi riuniti fra loro con cemento.

Si constatava che dopo quattro o cinque anni di servizio un gran numero di isolatori di questo tipo presentavano sulla testa e sulla gola delle leggere fessurazioni che occasionavano le perforazioni elettriche. Le fessurazioni avevano forme caratteristiche ben determinate per ogni tipo; così per il tipo Delta si manifestavano sul cono di testa con tagli di forma radiale (fig. 64), per il tipo Paderno ed a campana larga si manifestavano inizialmente al bordo del pezzo superiore e si estendevano poi alla campana sotto forma di tagli giacenti in semipiani meridiani (figg. 65-66-67-68).

Poichè le fessurazioni apparivano solo sul pezzo superiore ed eventualmente si estendevano al secondo pezzo negli isolatori in tre pezzi, e poichè le superfici di distacco erano linee prive di angoli vivi (fig. 69), questo fa pensare a sforzi elevati di lunga durata diretti dal pezzo interno verso quello esterno.

Siccome queste rotture hanno frequentemente generato gravi incidenti, una viva inquietudine si era impossessata degli esercenti le linee elettriche, tanto più che i tecnici non erano arrivati a scoprire definitivamente la vera causa dei difetti e si erano date delle interpretazioni errate.

Tra le altre supposizioni si era fatta anche quella dell'invecchia-

mento della porcellana e cioè che questa non fosse in grado di sostenere a lungo lo sforzo meccanico ed elettrico che a lei si richiedeva

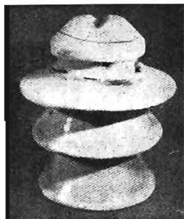


Fig. 64.



Fig. 65.



Fig. 66.

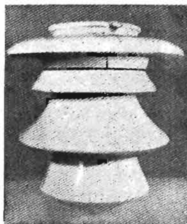


Fig. 67.

in linea; oppure che la porcellana presentasse delle tensioni interne che si rivelavano nel tempo producendo le fessurazioni recriminate.

E' ormai provato in maniera irrefutabile che nè il tempo nè le tensioni interne possono produrre i difetti in questione. Potremmo

citare numerosi esempi a favore di ciò, ma poichè è intuitivo ci limitiamo a rispondere con una domanda: perchè i difetti lamentati si verificavano solo negli isolatori in più pezzi e non in tutti i tipi di isolatori? Evidentemente perchè la causa è ben specifica e di carattere peculiare proprio dell'isolatore rigido in più pezzi.



Fig. 68.



Fig. 69.

Se effettivamente esistesse un invecchiamento della porcellana, questo si verificherebbe a maggior ragione su quei tipi che sono soggetti per la loro forma e funzione stessa a carichi meccanici elevati ed a carico elettrico non uniformemente distribuito, come ad esempio gli isolatori a sospensione e specificatamente il tipo Hewlett, che vedremo in seguito, che per la sua conformazione è soggetto a sopportare uno sforzo elettrico considerevole specialmente nelle gole che devono ricevere gli attacchi metallici. Orbene su questi tipi di isolatori non si sono mai generate fessurazioni di nessun genere anche dopo più di 20 anni di esercizio.

Se le tensioni interne fossero la causa dei guasti, questi si verificherebbero molto facilmente sui tipi presumibilmente soggetti ad esser sede di queste tensioni interne, come per esempio gli isolatori Rosenthal fabbricati in due pezzi ed uniti allo smalto; oppure in isolatori a forma molto irregolare con spessori molto elevati in alcuni

punti e piccolissimi in altri. Orbene in nessuno dei tipi sopra elencati, che sono o sono stati in servizio per diecine di anni, si è mai verificato l'inconveniente in questione.

Cause degli inconvenienti.

Da quanto sopra esposto si vede che la causa delle fessurazioni è di ben altro genere ed è dovuta appunto al cemento che serve ad unire le parti degli isolatori rigidi in più pezzi.

A causa del suo coefficiente di dilatazione più elevato di quello della porcellana in ragione di circa 4 volte (da $3{,}5 \div 5 \cdot 10^{-6}$ per la porcellana e da $12 \div 14 \cdot 10^{-6}$ per il cemento Portland puro) vengono ad esercitarsi sulla porcellana degli sforzi di pressione tali che questa non può più resistere, ed allora si manifestano le fessurazioni.

Una dilatazione così grande di un materiale strettamente racchiuso nella porcellana porta infallibilmente alla distruzione di essa se non si prendono misure precauzionali particolari.

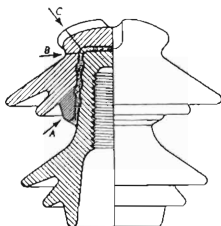
Con le forme originali impiegate in altri tempi per le parti degli isolatori che dovevano venire a contatto tra loro e cioè pareti cilindriche e contatto di testa piano con un raccordo quasi a spigoli vivi, (fig. 70) appare evidente che in corrispondenza dello spigolo si ha una zona di minor resistenza e rispettivamente una zona di concentrazione degli sforzi per cui un aumento di volume del cemento dovuto ad un aumento di temperatura provoca una pressione assai violenta esercitata sulla parete superiore dell'isolatore e per conseguenza la rottura.

Modifiche e perfezionamenti.

Per questa ragione si è adottato per la superficie superiore di contatto una forma emisferica (fig. 71).

Con questa forma si sono venute a rinforzare le zone di minor resistenza per cui un cemento con coefficiente di dilatazione più alto di quello della porcellana non può esercitare su questa gli stessi effetti di pressione che si verificavano nel tipo precedentemente considerato.

Inoltre la superficie sferica di contatto permette l'uscita all'ec-



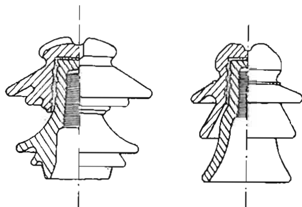


Fig. 70

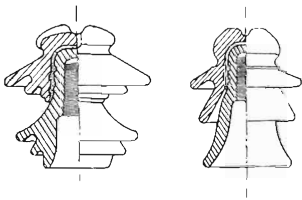


Fig. 71.

cesso di cemento al momento del montaggio; cosicchè nella parte superiore della testa la quantità di cemento viene ad essere notevolmente ridotta e non presenta più uno spessore nocivo. Oltre a ciò permette di eguagliare gli spessori, ciò che fornisce un'ottima resistenza dal punto di vista termico e permette anche un arrotondamento della forma esterna con vantaggi particolari dal punto di vista elettrico. È infatti risaputo che l'impiego di forme ben arrotondate, con grande raggio di curvatura, sprovviste di spigoli vivi e di forti salienti, permettono di eguagliare lo sforzo elettrico imposto all'isolatore.

La modifica di forma di cui abbiamo parlato è stato un passo avanti per evitare le fessurazioni lamentate, ma non era tutto; restava infatti da considerare la dilatazione del cemento ed al modo di ovviarvi onde evitare il possibile generarsi di inconvenienti.

Il cemento può aumentare di volume:

1) per dilatazione termica;

2) per assorbimento fisico di umidità;

3) per gonfiamento per effetto chimico.

Queste erano le tre cause più attendibili che unitamente ai difetti di forma hanno generato i guasti negli isolatori rigidi in più pezzi.

Gli sforzi dei fabbricanti sono appunto tesi ad eliminare le conseguenze degli effetti del cemento ed il fatto di aver ottenuto ottimi risultati con gli accorgimenti usati dà la certezza di aver colpito giusto il male alla radice e di averlo stroncato.

Lo sviluppo che ha preso la fabbricazione di isolatori composti è molto interessante ed appare come l'esperienza acquistata ha portato alla sicurezza d'impiego di questi isolatori.

Ai difetti che possono essere generati dalle tre cause suaccennate si è ovviato con accorgimenti di montaggio tali da eliminarli. Infatti contro le dilatazioni termiche del cemento si usa un impasto magro frammischiando al cemento granella di porcellana macinata in proporzioni tali che l'impasto venga ad avere un coefficiente di dilatazione uguale a quello della porcellana che deve essere montata.

È noto che la misura del coefficiente di dilatazione del cemento presenta delle grandi difficoltà in quanto che durante la presa del cemento si verificano delle contrazioni.

Infatti il riscaldamento dei provini di cemento che servono per la misura del suo coefficiente di dilatazione accelera il processo di presa generando una diminuzione di volume, che, se anche minima, può far sì che i risultati della prova vengono ad essere attendibili ma con una certa approssimazione.

Per mettersi in caso di assoluta sicurezza, oltre allo smagrante unito al cemento si verniciano anche le parti della porcellana che devono essere cementate, per evitare un legame assolutamente rigido tra i due materiali diversi a contatto, in modo da avere uno straterello elastico su ciascuna faccia, capace di assorbire l'eventuale dilatazione dovuta all'eventuale errore sperimentale di determinazione dei coefficienti di dilatazione. Lo straterello di vernice è tale da non esercitare nessuna azione chimica nel cemento, in modo che non potrà prodursi nessuna influenza durante la presa. Il rivestimento di vernice ha anche lo scopo di assorbire senza danno l'eventuale gonfiamento del cemento per effetto chimico.

Per evitare l'assorbimento di umidità da parte del cemento che resta a contatto dell'aria si vernicia questo anello con una vernice che lo protegga in tal senso, anche se il ritiro di presa del cemento può essere tale da sopportare ottimamente il gonfiamento per imbibizione. Questa verniciatura è di carattere precauzionale poichè non si è ancora provato l'esistenza di un simile difetto ed è intuitivo che essa si applica solo dopo che il cemento si è indurito ed ha fatto presa.

Altri tecnici in pubblicazioni anche abbastanza recenti hanno prospettato tra le cause eventuali di fessurazioni su isolatori rigidi, oltre quelle qui trattate, anche:

1) Una minor dilatazione del pezzo superiore rispetto a quello inferiore per un differente valore del coefficiente di dilatazione termica della porcellana dei due pezzi.

2) Una eventuale differenza di temperatura che può occasionalmente crearsi fra i pezzi cementati quando l'isolatore dopo una prolungata azione del sole venga bruscamente raffreddato da una pioggia.

Trattando queste cause si può dire che la minor dilatazione del pezzo superiore rispetto a quello inferiore non può succedere non

potendosi ammettere differenti valori del coefficiente di dilatazione dei due pezzi di porcellana foggiati con lo stesso impasto e cotti alla stessa temperatura, a meno di ammettere a priori una differente qualità di porcellana di un pezzo rispetto all'altro, il che potrebbe anche voler dire avere già in partenza un prodotto di scarto. (Es: un pezzo non ben cotto).

La differenza di temperatura che può crearsi tra i due pezzi non può generare le rotture lamentate perchè troppo piccola. Infatti detti isolatori sopportano ottimamente sbalzi di temperatura di 60÷70 °C coi cicli termici a cui vengono sottoposti nelle prove di collaudo per cui il raffreddamento della pioggia temporalesca dopo una giornata di sole non può causare danni. Anche se in linea il pezzo superiore si raffredda più in fretta di quello inferiore, lo sbalzo di temperatura è tanto piccolò per cui lo sforzo corrispondente può essere facilmente sopportato dalla porcellana.

Concludendo possiamo dire che i guasti spontanei negli isolatori rigidi in più pezzi erano dovuti esclusivamente al cemento che per il suo coefficiente di dilatazione molto superiore a quello della porcellana con cui veniva a contatto e per la forma stessa delle parti che dovevano essere cementate, non rispondenti allo scopo e che presentavano particolari sezioni delicate di minor resistenza, era in grado di produrre le fessurazioni caratteristiche. Adottate le modifiche e gli accorgimenti di cui abbiamo parlato, i guasti sono completamente scomparsi.

I fabbricanti guardano con perfetta tranquillità a questi tipi di isolatori ed anche gli esercenti di linee elettriche si sono persuasi che la tecnica degli isolatori di porcellana ha raggiunto dei risultati pienamente soddisfacenti tali da non destare in alcun modo apprensioni sul loro comportamento in linea, anche per i tipi in oggetto, anche alle lunghissime scadenze.

CAPITOLO VIII

ISOLATORI A SOSPENSIONE

Passiamo in rassegna lo sviluppo di questi tipi di isolatori dalle loro origini alla forma attuale mettendo in evidenza i pregi che li hanno fatti preferire agli isolatori rigidi che essi hanno sostituito.

Con l'aumentare delle tensioni di linea al disopra dei 50000 V. per le linee elettriche di trasmissione, gli isolatori rigidi necessari per queste nuove tensioni venivano ad essere di dimensioni tali che la loro realizzazione pratica veniva ad incontrare serie difficoltà. Si è dunque pensato di dividere gli isolatori in diversi elementi e di impiegare per lo scopo degli isolatori a sospensione.

Questo sistema presenta oltre al resto numerosi vantaggi nei confronti degli isolatori rigidi a perno anche dal punto di vista della costruzione delle linee ad alta tensione.

Le forme principali impiegate all'inizio per gli isolatori sospesi erano di due tipi:

1) il tipo chiamato « Hewlett » dal nome del suo inventore;
2) il tipo chiamato « a cappa e perno » dal suo montaggio.

Isolatori Hewlett.

Gli isolatori Hewlett sono stati costruiti per la prima volta nel 1906 negli Stati Uniti. La loro caratteristica è data dal fatto che nel corpo dell'isolatore sono praticati dei canali entro i quali sono infilate le corde di fissaggio agli elementi contigui. (fig. 72).

L'isolatore *a*) è costruito come isolatore di sospensione, mentre

quello *b*) come isolatore di amarraggio destinato ad essere montato in una posizione pressochè orizzontale.

Senonchè si può subito constatare a prima vista che questi isolatori presentano un percorso di scarica superficiale troppo lungo in rapporto alla resistenza disruptiva, perciò non hanno dato risultati troppo soddisfacenti.

In Germania si è aumentata la resistenza disruptiva a spese del percorso di scarica superficiale e si è inoltre semplificata la costruzione

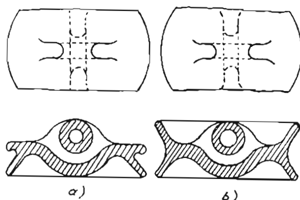


Fig. 72.

facendo in modo che un solo canale, esterno al piatto, sia mantenuto curvo, mentre l'altro è completamente diritto come mostra la fig. 73 .

Questa modifica ha permesso anche di diminuire le masse di spessore diverso nel corpo dell'isolatore.

Il tipo di amarraggio ha conservato la forma originale americana; è stato però pure creato un tipo di isolatore di amarraggio che diminuisce gli inconvenienti e che rappresenta una semplificazione del tipo precedente dal punto di vista della fabbricazione. (fig. 74).

Il tipo Hewlett così modificato non ha mai dato luogo ad inconvenienti notevoli. Anzi questo tipo è stato impiegato non solo come isolatore di sospensione per linee ad alta tensione, ma anche come amarraggio per linee ferroviarie e per altre soggette a sforzi meccanici abbastanza rilevanti.

Naturalmente molte sono le obbiezioni che si possono fare contro

l'impiego di questo tipo di isolatore, specialmente dal punto di vista elettrico.

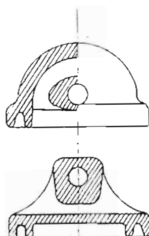


Fig. 73.

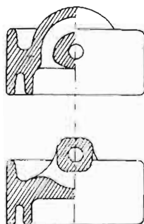


Fig. 74.

Accenniamo qui solo le principali:

1) La distribuzione del campo elettrico in ciascun isolatore è sfavorevole.

Infatti il campo non è omogeneo a causa della conformazione irregolare del corpo in porcellana e dei collegamenti; certe parti dell'isolatore sono particolarmente soggette a sforzo elettrico e la resistenza disruptiva è molto vicina alla scarica superficiale.

2) Piccola capacità propria che porta ad una sfavorevole distribuzione delle tensioni sui vari elementi di una catena.

Con questi isolatori l'elemento di una catena più prossimo alla linea subisce uno sforzo elettrico più elevato che gli altri. Però questo inconveniente teorico è molto attenuato nella pratica, come vedremo più avanti, cosicchè praticamente non è origine di noie.

3) La lunghezza relativamente grande di una catena di isolatori Hewlett dovuta ai nodi di giunzione.

Questo inconveniente abbastanza nocivo nella pratica può essere ridotto incrociando il nodo di connessione (fig. 75) oppure con qualche altro sistema (fig. 76).

Nella fig. 76 si vede che il nodo è sostituito da un disco che serve anche ad eguagliare la ripartizione della tensione tra i vari elementi e ad impedire la formazione di archi permanenti ai nodi, potendo questo portare alla fusione dei nodi stessi; inconveniente que-

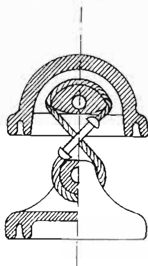


Fig. 75

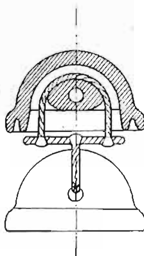


Fig. 76.

sto che si produceva spesso con questi tipi di isolatori specie quando il percorso della scarica superficiale doveva essere raccorciato con dei rivestimenti metallici. Il sistema di raccorciare il percorso di scarica con rivestimenti metallici costituì un miglioramento del singolo isolatore separato, ma favorì la formazione di archi ai nodi, fondendoli.

L'isolatore Hewlett può essere considerato come particolarmente resistente dal punto di vista meccanico, poichè la porcellana lavora solo a compressione; se anche l'elemento soggetto a compressione viene ad essere distrutto, la linea non può cadere ugualmente poichè le corde annodate in forma di catena vi si oppongono.

Isolatori a cappa e perno.

La differenza essenziale tra gli isolatori Hewlett e gli isolatori a cappa e perno consiste nel fatto che in questi ultimi le armature metalliche, il cemento e la porcellana formano un tutto unico.

Anche questo isolatore è stato costruito per la prima volta in America nella forma originale indicata nella fig. 77.

In America si è ugualmente impiegato un isolatore della stessa forma per l'amarraggio, ma essendo questi isolatori previsti per la posizione verticale, in posizione orizzontale avevano un comportamento elettrico non soddisfacente a causa della pioggia che bagnava tutta la superficie; si ovviò con l'impiego in amarraggio di elementi più numerosi per le catene. Inoltre essendo insufficiente la resistenza meccanica si accoppiarono gli elementi a due a due.

In Germania invece si costruì un tipo speciale d'isolatore d'amarraggio, studiato per l'impiego in posizione orizzontale dal punto di vista della protezione contro la pioggia; inoltre si ingrandirono le dimensioni della testa per ottenere una maggior resistenza alla trazione (fig. 78).

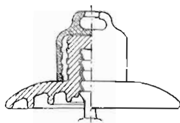


Fig. 77.

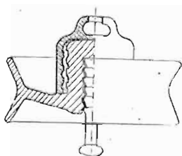


Fig. 78.

Inconvenienti dovuti all'impiego di isolatori a cappa e perno cementati.

Si constatava che gli isolatori a cappa e perno montati come i tipi precedentemente descritti perdevano la loro proprietà isolante dopo appena un paio d'anni di servizio e che a poco a poco un numero crescente di isolatori si perforava.

Il fenomeno si verificava alla stessa maniera tanto in America che in Europa. Gli isolatori presentavano delle sottili fessure che portavano alla perforazione dell'isolatore stesso ed il numero di isolatori che doveva essere cambiato cresceva di anno in anno. Nella maggior parte degli impianti si dovette cambiare la totalità degli isolatori dopo solo due o tre anni d'impiego. Molte pubblicazioni tecniche trattarono questo argomento e si riferirono ai difetti di fessurazioni e perforazioni riscontrate precedentemente sugli isolatori rigidi a perno.

Grande fu la costernazione presso le Società esercenti linee elettriche per i difetti inerenti a questi isolatori ai quali si era ricorso per i difetti riscontrati su quelli rigidi e poichè nel frattempo si erano migliorati i tipi rigidi, si ritornò in molti casi a questi tipi anche per tensioni elevatissime.

Dapprima si era creduto anche qui che i difetti fossero causati dalla qualità della porcellana che, invecchiando, desse luogo a tensioni interne; ma ben presto si scoprì che la vera causa dei difetti constatati stava nelle influenze termiche che esercitavano azioni meccaniche distruttive per la porcellana.

Numerose prove hanno permesso di stabilire due categorie di fenomeni distruttivi per l'isolatore a cappa e perno:

1) La prima dipendeva dal fatto che il bordo della cappa metallica appoggiava direttamente sul piatto di porcellana. Essendo il coefficiente di dilatazione del ferro più di tre volte superiore a quello della porcellana, ogni dilatazione nel senso longitudinale doveva esercitare una pressione molto elevata sul piatto in modo che questo non poteva resistere a lungo e si formavano perciò delle piccole screpolature che si amplhavano col tempo e portavano infine alla perforazione.

2) La seconda serie di difetti dipendeva dal fatto che anche il perno cementato all'interno era soggetto a dilatazioni ed esercitava delle pressioni attraverso il cemento rigido, producendo a sua volta delle fessurazioni.

Collegamento elastico.

Per evitare i difetti sopra elencati bisogna prendere le precauzioni affinchè le parti metalliche possano dilatarsi liberamente. In primo luogo bisogna che la cappa non appoggi direttamente sul piatto di porcellana.

Mentre negli isolatori rigidi non si trovano a contatto che due materiali a coefficiente di dilatazione diverso ed a proprietà fisiche diverse, nell'isolatore a sospensione si trovano uniti tre elementi differenti e cioè: ferro, cemento e porcellana.

Nella tabella seguente sono indicate le differenti proprietà fisiche di questi materiali.

TABELLA VII.

Confronto tra alcune proprietà fisiche della porcellana, del cemento e del ferro.

Materiale	porcellana	cemento	ferro
Coeff. di dilatazione	0,0000036	0,000011	0,000011
Conducibilità calorifica Cal/h mc °C	0,7 ÷ 0,8	0,78	400
Capacità calorifica Cal/Kg °C	0,25	0,27	0,17 ÷ 0,12
Rapidità di assorbim. del calore (¹)	0,0033	0,00064	0,19
Conservazione del calore (²)	302	1560	5,3

Non basta dunque che il coefficiente di dilatazione di due materiali sia reso il più vicino possibile, ma bisogna ancora tener conto della necessità di neutralizzare gli effetti distruttivi del terzo; questo specialmente per la dilatazione del perno.

Anche quando si è arrivati a fare un cemento che abbia la stessa dilatazione della porcellana non bisogna tralasciare di dargli una certa elasticità, poichè malgrado le aggiunte che rendono i coefficienti di dilatazione uguali praticamente, il cemento non può essere trattato come facente un tutto unico con la porcellana. Ancora più accentuata è questa differenza per le parti metalliche e non si può correggere que-

(¹) È proporzionale alla conducibilità calorifica. I valori su riportati sono rapportati ad 1 cmc.

(²) È direttamente proporzionale alla capacità calorifica ed inversamente alla conducibilità calorifica. I valori su riportati sono rapportati ad 1 cmc.

sta enorme differenza di dilatazione, perciò bisogna far in modo che le parti metalliche abbiano la possibilità di dilatarsi liberamente nel cemento.

Questa esigenza deve essere particolarmente rispettata quando il coefficiente di dilatazione del cemento è stato abbassato per aggiunta di materiale smagrante, poichè mentre prima si poteva considerare il cemento ed il ferro come un tutto unico, con la correzione del coefficiente di dilatazione del cemento bisogna fare in modo che il perno possa dilatarsi liberamente senza esercitare azioni nocive. Si sono perciò modificate le parti metalliche e la forma dell'isolatore stesso arrotondando il tutto in modo da poter assicurare, nei limiti del possibile, una libera dilatazione in tutti i sensi e nello stesso tempo migliorando le condizioni elettriche dell'isolatore stesso. Inoltre è stata aumentata l'altezza della testa dell'isolatore in modo da ottenere una più grande superficie di contatto e di poter far lavorare la porcellana a compressione. Per permettere la libera dilatazione del cemento si sono spalmate tutte le parti che devono venire a contatto con esso, di uno strato di paraffina o di lacca e per diminuire la quantità di cemento nel fissaggio del perno si sono messi dei semianelli conici di porcellana cosicchè l'isolatore a sospensione venne ad avere la forma come in fig. 79.

Gli studi inerenti a queste modifiche sono stati fatti in Svezia, a Stoccolma, dall'Ing. Laurell; furono impiegati per la prima volta sulla linea Untra - Stoccolma e da qui presero il nome di tipi Untra.

I risultati ottenuti sono stati buoni; solo si veniva a diminuire la resistenza meccanica per il fatto che il rivestimento elastico di contatto col cemento portava a questo risultato.

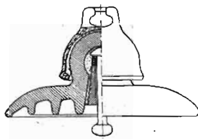


Fig. 79.

Isolatori a doppia testa.

La constatazione della diminuita resistenza meccanica degli isolatori sopra descritti ha portato allo studio di un nuovo tipo di isolatore a doppia testa, come rappresentato in fig. 80.

Le prove meccaniche eseguite allo scopo di determinare con esattezza la resistenza della porcellana alla trazione hanno dato dei valori abbastanza elevati, intorno ai 250÷300 Kg/cmq. per cui è stato possibile costruire un isolatore del tipo sopra indicato, con resistenza meccanica superiore ai 3000 Kg.

La resistenza disruptiva è tanto elevata che non è possibile la perforazione neppure sotto olio.

Prove eseguite in Germania su questo tipo di isolatore con una trazione verticale di 2000 Kg. ed una trazione simultanea di 1000 Kg. nel senso orizzontale hanno dato ottimi risultati.

Attualmente si costruiscono tipi di isolatori a doppia testa con rottura superiore ai 10.000 Kg.

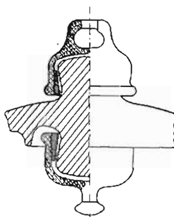


Fig. 80.

Isolatori montati senza cemento.

Per evitare un'unione rigida tra le armature metalliche e la porcellana e per poter sfruttare la resistenza a compressione della porcellana stessa, che è molto superiore di quella a trazione, lascian-

do nello stesso tempo una certa libertà di movimento nelle armature, si è arrivati a studiare dei sistemi di unione senza impiego di cemento.

Numerose prove fatte su modifiche successive hanno dato risultati soddisfacenti ed è seguendo questa strada che si è arrivati ai sistemi di montaggio attualmente adottati in Europa per gli isolatori sospesi a cappa e perno.

Passiamo in rassegna alcuni tipi di montaggio eseguiti in questo senso.

La fig. 81 mostra il primo tipo di questi isolatori, dovuto a Jaensch, in cui la sola cappa è cementata.

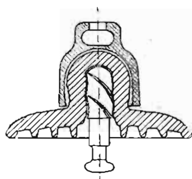


Fig. 81.

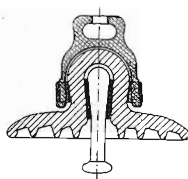


Fig. 82.

Degli anelli filettati sono ricavati sul perno ed al momento del montaggio si avvitano nella cavità di forma corrispondente della porcellana fissando ad essa il perno.

Le prove eseguite con questo isolatore non hanno dato un buon risultato per il fatto che la superficie di contatto tra il metallo e la porcellana era troppo piccola ed inoltre l'anello a vite non appoggiava in tutta la lunghezza della filettatura, ma soltanto in qualche punto.

Tutto lo sforzo meccanico veniva quindi sopportato da una superficie di porcellana troppo ristretta e ciò portava ad un intenso sforzo localizzato su quest'ultima.

Un altro sistema di montaggio senza cemento è rappresentato nella fig. 82.

Il perno ha un filetto molto acuto avvitato in una madrevite

filettata col medesimo passo. Per impedire al perno di svitarsi si possono impiegare dei riempitivi che si adatteranno nei rinforzi corrispondenti della porcellana e di preferenza si adoperano riempitivi in piombo.

Prove eseguite su isolatori montati con questo sistema hanno mostrato che si ottiene una resistenza sufficiente alla trazione e che inoltre il perno può anche essere fortemente riscaldato senza che la sua dilatazione possa influire sulla porcellana, poichè c'è giuoco sufficiente per tutte le dilatazioni.

Le figure 83 e 84 mostrano due altri sistemi di montaggio senza cemento.

Osservando la fig. 83 vediamo che tra le parti metalliche e la porcellana sono messi dei riempitivi che si fissano fortemente contro la porcellana allorchè si montano il perno e la cappa.

Anche con questo sistema si ottiene una resistenza meccanica sufficiente.

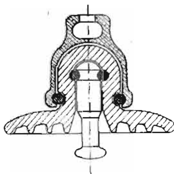


Fig. 83.

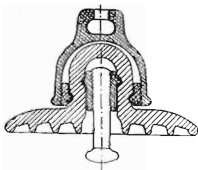


Fig. 84.

Nella figura 84 si vede come il montaggio senza cemento è ottenuto per mezzo di anelli filettati, in due parti, tali che le parti sporgenti si adagiano in cavità corrispondenti della porcellana. Lo sforzo meccanico in questo tipo di isolatore si trasmette pressochè nello stesso modo che nell'isolatore di Jaensch; c'è però il vantaggio di poter adattare alle pareti di porcellana, per tutta la superficie che interessa, le parti metalliche in rilievo, che possono essere fatte pre-

sensibilmente in cuoio ricoperto da una superficie di piombo, aggiungendo così elasticità alla buona resistenza meccanica.

Il sistema di montaggio senza cemento è stato provato anche sugli isolatori a doppia testa, ma per questi il cemento usato per il montaggio non può dar luogo ad inconvenienti, perciò è da considerare come uno studio sperimentale più che una ricerca per un miglioramento di cui effettivamente si sentisse la necessità.

Negli isolatori montati senza cemento, per poter avere una buona distribuzione del campo elettrico, è necessario rivestire con materiale elettricamente conduttore la parte di porcellana a contatto con un cuscinetto d'aria racchiusa, per evitare la ionizzazione di questa. Questo ricoprimento conduttore è stato ottenuto metallizzando la superficie di porcellana fronteggiante l'armatura.

Sistemi di montaggio moderni.

Attraverso alle modifiche suaccennate si è arrivati ai sistemi di montaggio attuali, che, tenendo conto dei miglioramenti gradualmente portati all'isolatore sospeso, hanno permesso di garantire questi isolatori a rilevanti valori per il carico critico e ad ancora più rilevanti carichi meccanici con rotture di molto superiori alle garanzie stesse.

I valori raggiunti sono tanto più significativi se si tiene conto del relativamente basso carico di servizio in linea (circa 1500 ÷ 1800 Kg. di carico in linea contro una garanzia di 5000 Kg. al carico critico ed una garanzia di 6500 Kg. a rottura meccanica, con una rottura effettiva di circa 8000 Kg. per il tipo a sospensione normale ed una garanzia di 6000 Kg. al carico critico ed 8000 Kg. al carico meccanico con una rottura effettiva che supera i 10000 Kg. per il tipo di amarraggio; con tipi rinforzati si arriva anche a garanzie meccaniche di 10000 Kg. con rotture effettive di 12 ÷ 14000 Kg). I sistemi di montaggio attualmente seguiti hanno tenuto conto delle esperienze passate cosicchè abbiamo diversi tipi a seconda dei costruttori. Però è da osservare che in Europa ci si è orientati verso i tipi o completamente senza cemento o con la sola cappa cementata ed il perno montato con sistema elastico o con lega di piombo, pur essendovi diverse fabbriche che montano cappa e perno con cemento, mentre in America si è rimasti fedeli

all'isolatore con montaggio a cemento sia per la cappa che per il perno, osservando naturalmente speciali accorgimenti in modo da permettere le dilatazioni delle parti metalliche senza pericolo di danno per la porcellana.

Le figure seguenti mostrano i vari tipi di isolatori sospesi che attualmente si fabbricano in Italia. Per i particolari del montaggio rimandiamo al capitolo che tratta espressamente di questo.

La fig. 85 mostra gli isolatori di tipo normale e ridotto Richard-Ginori con cappa e perno montati con lega di piombo-antimonio.

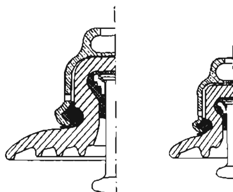


Fig. 85

La fig. 86 mostra gli isolatori di tipo Verbano.

Due sono i tipi di isolatori a sospensione costruiti da questa fabbrica:

— uno è il tipo montato con perno a sfere e lega di piombo-antimonio e cappa cementata;

— l'altro è il tipo con perno « testa a cono » (brevetto Smith) e cappa cementata.

La figura 87 mostra l'isolatore della Ceramica Ligure con perno montato con due anelli elastici (molle) annegati nella lega metallica e cappa cementata.

Le figure seguenti mostrano alcuni tipi di isolatori a sospensione di produzione straniera.

La fig. 88 mostra l'isolatore Rosenthal K 2.

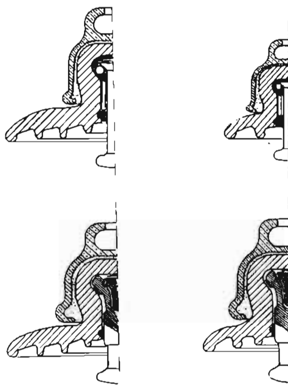


Fig. 86.

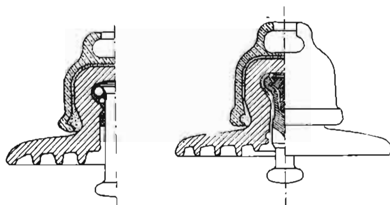


Fig. 87. Fig. 88.

Da notare in questo isolatore che la cappa ha una conicità inversa rispetto alla testa dell'isolatore; la cappa è cementata mentre il perno è del tipo testa a cono; nella camera dell'isolatore oltre alle normali guarnizioni ce n'è una di gomma che oltre a proteggere la porcellana da eventuali urti del perno durante il montaggio, ha il compito di distribuire meglio le linee di forza nel punto di maggior concentrazione del campo elettrico.

La fig. 89 mostra un isolatore di tipo americano e precisamente della Lapp Insulator Company.

Questo isolatore ha cappa e perno cementati; però sia sulla porcellana prospiciente la cappa lungo la linea di maggior sforzo sia nella camera dove è montato il perno, è stato messo uno strato di materiale elastico capace di assorbire le dilatazioni del cemento in modo da garantire la porcellana da qualsiasi danno.

La fig. 90 mostra un altro isolatore americano e precisamente il tipo montato dalla Ohio Brass Company. Anche qui cappa e perno sono montati con cemento coi necessarì accorgimenti per le libere dilatazioni.

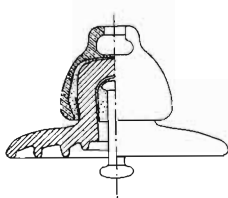


Fig. 89.

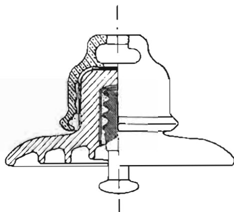


Fig. 90.

Comportamento meccanico dell'isolatore a sospensione.

Come abbiamo già detto l'isolatore sospeso può raggiungere valori elevatissimi al carico meccanico per il fatto che la sua conforma-

zione è stata studiata in modo da far lavorare la porcellana a compressione con un carico di circa 5000 Kg./cmq. nei confronti del basso carico a trazione (circa 250 ÷ 300 Kg/cmq.).

Un calcolo teorico meccanico per questi isolatori non è stato fatto perchè per la loro forma e costituzione non si prestano ad uno studio analitico delle forze che in essi si creano e tutte le modifiche inerenti al loro miglioramento sono state eseguite in base ad esperienze. Ciononostante si può impostare un calcolo empirico considerando la testa dell'isolatore come un cuneo a sezione conica imprigionato in un anello metallico rappresentato dalla cappa, attraverso uno strato di cemento e verificare gli sforzi che viene a sopportare questo materiale.

Facciamo un esempio pratico prendendo in esame un isolatore come in fig. 91 e calcoliamo gli sforzi che viene a sopportare il cemento.

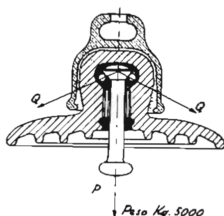


Fig. 91.

Supponiamo che il complesso perno-sfere-lega-testa dell'isolatore formino un tutto unico e rigido e che lo sforzo applicato al perno (nel nostro caso supposto di 5000 Kg.) si trasmetta integralmente alla cappa attraverso il legante (cemento). Scomponiamo la forza applicata P in due forze Q normali ai fianchi del cuneo; siano a b h la testa, il lato e l'altezza del cuneo si ha: a = cm. 8,3 b = cm. 153,5 h = cm. 53.

Applichiamo la formula

$$P = 2f(Q\,h/b + Q\,a/b)$$

dove f = tg ρ dove ρ = angolo d'attrito
Assumendo f = 0,75 e sostituendo e risolvendo rispetto a Q avremo

$$Q = 5000/1,5 \times 0,99 + 0,154 = 5000/1,63 = \text{Kg } 3050$$

quindi lo sforzo totale che agisce sull'anello di cemento è:

$$\text{Kg } 3050 \times 2 = \text{Kg } 6100$$

L'area del cemento su cui lo sforzo viene trasmesso è data dalla superficie laterale del cilindro che ha per base la circonferenza di base della testa dell'isolatore e per altezza l'altezza della zona di cemento sollecitata a compressione che supponiamo di tre centimetri.

Quindi avremo

$$2\pi r h = 6,28 \times 4,2 \times 3 = 79,2 \text{ cmq}$$

e lo sforzo sopportato dal cemento a compressione è di Kg./cmq. 76

Gli sforzi che il cemento deve sopportare vengono ad essere rilevanti, ma dobbiamo tener presente che i 5000 Kg. di carico supposti sono già superiori al carico critico (4500 Kg.) per cui l'isolatore è garantito, quindi siamo abbastanza vicini allo snervamento del materiale. Dobbiamo inoltre tener presente che il cemento impiegato è del tipo ad alta resistenza.

Passando alla considerazione dell'isolatore sospeso dal punto di vista meccanico in generale, vediamo che esso può essere sottoposto a sforzi rilevanti e vicini al punto di rottura senza che il complesso perda della sua resistenza meccanica ed elettrica.

In prove di collaudo si verifica spesso la rottura delle parti metalliche di attacco (orbita della cappa e gambo del perno) prima che ceda il sistema porcellana-cemento e questo sta a dimostrare come l'isolatore a sospensione dia il più grande affidamento dal punto di vista considerato.

Comportamento elettrico dell'isolatore a sospensione.

Tenendo presente la caratteristica dell'isolatore sospeso di essere nato per poter essere impiegato in più pezzi collegati a catena per sopportare tensioni elevate, dobbiamo considerare il comportamento elettrico di una catena di questi isolatori e non di un singolo elemento.

Prendiamo perciò in considerazione la distribuzione della tensione in una catena di isolatori sospesi.

Gli elementi di una catena più prossimi alla linea sono attraversati da una corrente di capacità più grande, specialmente in ragione della capacità degli isolatori in rapporto alla terra ed alla loro capacità intrinseca. Per questa ragione essi sopportano una tensione maggiore di quella che dovrebbero sopportare con una uguale distribuzione di tensione fra i vari elementi.

Più piccola è la capacità propria di ciascun elemento, più grande è la tensione che deve sopportare l'elemento più vicino alla linea e meno grande la partecipazione degli elementi più vicini all'attacco, alla tensione.

La distribuzione della tensione può essere misurata in via sperimentale o per mezzo della distanza esplosiva o con l'aiuto di un galvanometro sensibile montato sull'isolatore.

Già fin dal 1911 il Prof. Petersen ha misurato sperimentalmente la distribuzione della tensione su una catena di isolatori impiegando un galvanometro sensibile fissato all'isolatore e costruito in modo da non modificare la capacità di questo. L'Officina di Elettricità di Stoccolma ha applicato delle miscele esplosive globulari ad un isolatore normale. Queste miscele esplosive furono messe in diversi punti della catena e partendo dall'elemento su cui era stata messa la miscela si poteva lanciare una tensione di differenti valori prima che la miscela esplosiva reagisse.

Questo sistema di prova potrebbe essere preso in considerazione se il valore della tensione non influisse sulla propria distribuzione; ma a partire dal momento in cui l'elemento inferiore presenta degli effluvi anche di debole intensità, la capacità e per conseguenza la distribu-

zione della tensione sulla catena si modifica in rapporto alla ionizzazione dell'aria che circonda la catena.

Per non elencare le numerose prove diremo che in base alle esperienze eseguite, per una tensione di 100.000 V. si è trovato che l'elemento più vicino alla linea porta circa il 30 % della tensione applicata e l'elemento più vicino all'attacco circa il 20 %.

Numerose esperienze sono state eseguite per ottenere una ripartizione più favorevole. Tutte si basavano sulla graduazione della capacità dei diversi elementi e si impiegarono isolatori di spessore più sottile per l'elemento inferiore della catena.

Il Prof. Petersen fece delle esperienze impiegando per la catena tre gruppi di isolatori di capacità differente ed ottenne una ripartizione molto favorevole della tensione.

Certo che questa era una soluzione non pratica, quindi la Rosenthal raggiunse lo scopo ricoprendo i dischi di porcellana con un rivestimento metallico e questo sistema permetteva di impiegare gli stessi isolatori per tutta la catena, però c'era lo svantaggio della diminuzione del percorso della scarica superficiale per gli elementi inferiori.

Negli ultimi tempi si è considerato che allorchè l'aria è umida o nel caso di pioggia, le superfici di porcellana diventano conduttrici per cui la distribuzione della tensione si uguaglia notevolmente; d'altronde allorchè la resistenza dell'elemento inferiore è in pericolo, l'ionizzazione dell'aria che si produce viene a scaricare l'elemento compromesso grazie all'aumento della capacità sua propria.

L'esperienza ha mostrato che nella pratica non si verificano fatiche eccessive anche per elementi fortemente caricati. Infatti se consideriamo una catena per 100.000 V. composta di 7 elementi, vediamo che l'elemento vicino al conduttore porta circa 30.000 V. Ora la tensione di perforazione è di circa 140.000 V. per elemento e l'arco sottopioggia di 50.000 V. di modo che anche con una distribuzione più sfavorevole di tensione, l'elemento inferiore non è compromesso per quanto concerne la perforazione; bisognerà però tener presente, in caso di tensioni più elevate, di usare degli accorgimenti per mantenere la tensione parziale portata dall'elemento inferiore ad un valore notevolmente più basso della scarica sottopioggia, poichè pur aumentando

il numero di elementi della catena non si riesce a scaricare l'elemento inferiore. Questo scopo è stato raggiunto montando sulla catena delle protezioni oppure diminuendo l'altezza di ogni singolo elemento. Il primo sistema è quello più facilmente realizzabile e l'Ing. M. Laurell dell'Officina di Elettricità di Stoccolma ha migliorato con un sistema di protezione la distribuzione della tensione in modo che l'elemento inferiore veniva a sopportare solo un sovraccarico del 18 % della tensione parziale, proporzionalmente al numero degli elementi.

Attualmente le catene di isolatori vengono montate con scaricatori a corna o con anelli di guardia.

Riportiamo qui sotto i risultati di *prove di archi sottopioggia eseguite su catene di isolatori d'amarraggio tipo Verbano.*

TABELLA VIII.

Sospensione normale con relativi anelli di guardia.

Numero degli elementi	Tensione raggiunta	
6	220 KV	arriv. all'arco in 30'' con due fasi isolate
7	275 »	
8	300 »	
9	330 »	
10	370 »	

TABELLA IX.

Ormeggio orizzontale doppio con anelli di guardia.

Numero degli elementi	Tensione raggiunta	
7	260 KV	arriv. all'arco in 20'' con due fasi isolate
8	280 »	
9	320 »	
10	360 »	

TABELLA X.

Ormeggio doppio inclinato di 15° con anelli di guardia.

Numero degli elementi	Tensione raggiunta	
5	150 KV	arriv. all'arco in 10" con una fase a terra
5	160 »	arriv. all'arco in 10" con due fasi isolate
6	190 »	
7	230 »	
8	260 »	
9	290 »	
10	340 »	

I valori ottenuti sono riassunti nel diagramma della figura 92.

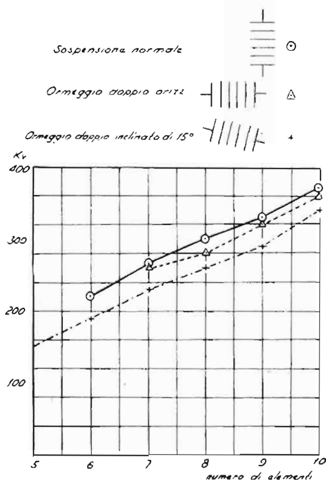


Fig. 92.
Archi sottopioggia su una catena di isolatori per amarraggio tipo Verbano

CAPITOLO IX

ISOLATORI A BASTONE A NUCLEO PIENO

L'isolatore a bastone a nucleo pieno è formato da un corpo isolante di lunghezza proporzionale alla tensione che deve portare; ad esso sono attaccate delle campane che hanno come scopo principale di ripararlo dalla pioggia ed è montato alle due estremità con due cappe metalliche (fig. 93).



Fig. 93.

Questo isolatore è nato con lo scopo di sostituire le catene di isolatori sospesi, per i numerosi vantaggi che, secondo Ziegler, presenta nei confronti di questi.

Confronto fra l'isolatore a bastone ed una catena di isolatori sospesi.

Noi faremo un confronto tra l'isolatore a bastone ed una catena di isolatori sospesi da tre punti di vista e cioè:

1) Elettrico;

2) Meccanico;

3) Economico.

1) Dal punto di vista elettrico. — L'isolatore a nucleo pieno si costruisce per tensioni d'esercizio fino a 150 kV.; esso è fatto in modo che il corpo principale anche senza campane è in grado di sopportare

la tensione per cui è stato costruito. Le campane vengono quindi ad assumere l'ufficio di proteggere dalla pioggia più che quello di aumentare il percorso della scarica. Il diametro delle campane si costruisce di dimensioni doppie di quello del corpo principale. È noto, e l'abiamo visto anche nel capitolo precedente, che il potenziale su una catena di isolatori non si ripartisce equamente su ogni elemento, ma il campo elettrico è molto più intenso sull'elemento vicino al conduttore (circa il 30 %) e sull'elemento vicino alla terra (circa il 20 %); con questo tipo di isolatore è possibile distribuire le campane lungo il corpo in relazione al campo elettrico e cioè avvicinandole nelle zone vicine al conduttore ed alla terra ed allontanandole nella zona media, sempre però compatibilmente con lo scopo di protezione che queste debbono avere per la pioggia. (fi. 94).



Fig 94.

Abbiamo visto più sopra che anche per gli isolatori a catena questa equa distribuzione del potenziale sarebbe possibile mettendo degli isolatori più grandi in testa ed in coda alla catena, ma sarebbe, per ovvie ragioni, una soluzione irrazionale.

Per ottenere una distribuzione proporzionata del campo elettrico si potrebbe anche accumulare porcellana vicino alle estremità dell'isolatore a bastone per fare in modo che un maggior numero di linee di forza percorrano la porcellana, di alta costante dielettrica, invece dell'aria. Però anche facendo in questo modo bisogna tener presente di proteggere l'isolatore dalla pioggia. Naturalmente la soluzione più logica, più razionale e di più facile esecuzione è la prima; anzi con questa soluzione si raggiunge anche il vantaggio di avere una tensione di scarica sotto pioggia abbastanza vicina alla tensione di scarica a secco.

Negli isolatori a catena le parti metalliche di perni e cappe sono in parte preponderante sulla porcellana (fino circa l'80 %) quindi il

materiale conduttore è molto maggiore di quello isolante, perciò per raggiungere una tensione di scarica corrispondente alla distanza esplosiva approssimativa della lunghezza della catena, sono necessarie già a secco delle campane che aumentino il percorso della scarica e che uguaglino per lo meno l'abbreviamento che viene a subire per effetto delle parti metalliche.

In caso di rottura della campana di un isolatore in una catena è necessario procedere sollecitamente al cambio dell'isolatore poichè per la ragione sopraddetta, essendo già piccolo il tratto isolante nei confronti delle parti conduttrici, la catena isolante ne risente subito lo sbalzo.

Nell'isolatore a bastone a nucleo pieno, essendo le campane indipendenti dal punto di vista elettrico come pure dal punto di vista meccanico, la rottura parziale di queste o anche di tutte non pregiudica, a secco, la funzione dell'isolatore.

Secondo le esperienze di Ziegler e secondo prove eseguite da noi stessi e riportate più sotto, la misura della tensione di scarica a secco non dimostrò di subire alcuna influenza dallo stato più o meno danneggiato delle campane. Infatti le prove eseguite su un isolatore a 10 campane hanno dimostrato che si ottiene solo una differenza di 20 kV. per la tensione di scarica a secco sia che l'isolatore sia intatto, sia che all'isolatore siano state asportate tutte le campane.

La tensione di scarica sottopioggia dipende invece dallo stato delle campane dell'isolatore e specialmente si risente l'influenza se sono danneggiate le campane vicino al conduttore o vicino alla terra, appunto perchè se sono danneggiate le campane superiori si ha diminuzione del potere protettivo contro la pioggia e se sono danneggiate quelle inferiori si ha una variazione nella distribuzione del campo elettrico.

La dipendenza dell'arco sotto pioggia dallo stato di conservazione delle campane ci dà però dei valori che sono in proporzione molto minori di quello che comporti una catena di isolatori nello stesso stato.

Quindi in queste condizioni più sfavorevoli non è necessario procedere ad un rapido cambio dell'isolatore, ma questo può ancora adempiere al suo compito anche così mutilato. Naturalmente ciò non vuol

dire che si possa lasciare in linea un isolatore per un tempo indeterminato, poichè gli agenti atmosferici ed il sudiciume possono alterare le sue condizioni di funzionamento; inoltre con la pioggia e nella nebbia avrebbe un cattivo funzionamento elettrico.

Una condizione svantaggiosa dal punto di vista elettrico è quella che gli isolatori a bastone a nucleo pieno presuppongono nella loro forma di costruzione stessa le armature di protezione per l'arco, poichè se dovesse scoccare un arco tra le due estremità, questo seguendo la superficie isolante potrebbe distruggere l'isolatore stesso e provocare la caduta della linea, mentre negli isolatori a catena anche se l'arco dovesse distruggere il piatto di qualche elemento, diventerà minore il potere isolante della catena, ma è difficile che la linea cada.

Concludendo possiamo dire che elettricamente l'isolatore a bastone è senza dubbio superiore ad una catena di isolatori a cappa e perno.

Riferiamo qui di seguito i risultati di prove da noi eseguite su isolatori a bastone a 10 campane e della lunghezza di 800 mm.

Gli isolatori sottoposti a prova hanno subito 25 cicli termici con sbalzo di temperatura di 70 °C senza subire alcun danno.

Arco a secco	kV.	240
» sottopioggia	»	170

Intensità della pioggia 4 mm. al minuto.

Tabella XI.

Prove di archi a secco e sottopioggia su un isolatore dal quale sono state asportate man mano delle campane, cominciando da quelle centrali ed arrivando all'asportazione totale.

Numero delle campane asportate	Arco a secco KV	Arco sottopioggia KV
0	240	170
1	240	156
2	238	130
4	235	128
6	230	108
8	228	90
10	220	80

I valori ottenuti sono riportati nei diagrammi seguenti (fig. 95):

I risultati ottenuti sono tali da dimostrare che il comportamento a secco, dell'isolatore è pressochè uguale sia con tutte le campane intatte sia con tutte le campane asportate.

La stessa cosa non si può dire riguardo al comportamento elet-

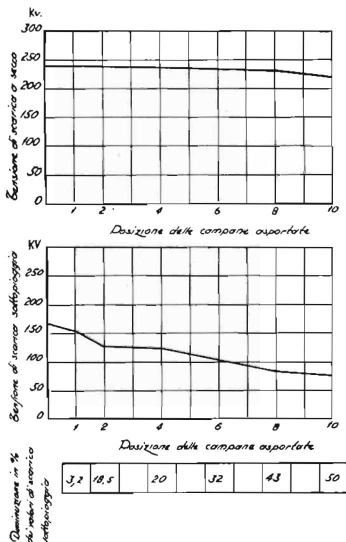


Fig. 95.

trico sottopioggia ed infatti lo Ziegler a questo proposito ha trovato nelle sue esperienze una diminuzione dal 4,8 % al 46,8 % progredendo nell'asportazione delle campane da una a tutte. Noi abbiamo ottenuto degli sbalzi ancora più grandi e cioè dal 3,2 % al 50 %.

2) Dal punto di vista meccanico. — Dimostrato che l'isolatore a bastone ha un comportamento elettricamente migliore di una catena di isolatori a cappa e perno non vuol dire che esso sia il più perfetto degli isolatori ad alta tensione sotto tutti i punti di vista, poichè per le linee ad alta tensione sono parimenti decisive le proprietà elettriche e quelle meccaniche.

Un punto sfavorevole per l'isolatore a bastone nei confronti di una catena di sospesi l'abbiamo già visto quando abbiamo considerato che un arco può anche distruggere l'isolatore a bastone con conseguente caduta della linea. Inoltre la superficie grande e compatta di un isolatore a bastone è più soggetta a subire l'effetto degli sbalzi di temperatura e l'effetto degli urti, quindi è più facilmente incrinabile. A questo va aggiunto che il corpo unico e quindi rigido di questo isolatore, pur se imperniato alle due estremità, presenta uno svantaggio nei confronti di una catena completamente snodata nei suoi elementi, specialmente se dalla posizione di sospensione passiamo a quella di amarraggio, dove possono entrare in giuoco forze complesse dovute ai colpi di frusta, ecc.

La condizione più sfavorevole a questi isolatori è data dal fatto che in essi la porcellana lavora a trazione, mentre nei sospesi a compressione, e data la quasi impossibilità di ottenere bastoni perfettamente diritti ed assiali può entrare in giuoco uno sforzo di flessione assai dannoso; inoltre dato il relativamente basso carico della porcellana a trazione nei confronti dell'elevato carico di compressione, anche piccolissime variazioni di qualsiasi genere possono influenzare enormemente il comportamento meccanico. (Es.: temperatura di cottura). Prove meccaniche da noi eseguite su bastoni a 10 campane della lunghezza di 800 mm. con un tronco ϕ 58 mm. hanno dato risultati con sbalzi anche di 4000 Kg. tra isolatori identici.

3) Dal punto di vista economico. — Ammesso che per una linea a 100 kV. occorra una catena di 7 isolatori a cappa e perno od un isolatore lungo 1 metro, verremo ad avere nel primo caso 7 cappe e 7 perni e nel secondo caso due sole cappe; risulta evidente il risparmio di parti metalliche che si ha nel secondo caso, pur tenendo presente che nel secondo caso dovremo tener conto anche degli anelli di guardia. Anche dal punto di vista del montaggio si potranno montare rapidamente e con minor spesa gli isolatori a bastone che non catene di sospesi corrispondenti.

Uno svantaggio dal punto di vista pratico per gli allestitori di linee elettriche ad alta tensione sarebbe quello di dover acquistare dei bastoni di dimensioni e forme specifiche per ogni tensione di linea del loro esercizio, con l'impossibilità dell'intercambiabilità degli elementi che è uno dei vantaggi dell'isolatore sospeso.

In Germania è già stata allestita qualche linea con questi tipi di isolatori ed ha dato discreti risultati, però le considerazioni sul comportamento meccanico di questi isolatori non ne hanno favorito lo sviluppo.

In America sono stati impiegati in sostituzione parziale degli isolatori sospesi, isolatori a colonnino montati sulle traverse dei pali come isolatori rigidi, ed hanno dato ottimi risultati.

Concludendo possiamo dire che l'isolatore a bastone per le considerazioni fatte merita di esser preso in esame, però fino a dimensioni non troppo grandi e per tensioni non troppo elevate di modo che pur avendosi un buon risparmio non si viene a pregiudicare il comportamento meccanico di una linea elettrica.

CAPITOLO X

ISOLATORI ANTISALE ED ANTINEBBIA

Isolatori antisale.

Sulle linee che corrono in vicinanza del mare e parallelamente alla costa, nelle giornate di vento di mare, la superficie degli isolatori viene ad essere investita da un'aria estremamente carica di un'umidità ricca di sali marini che lasciano sull'isolatore stesso un deposito di questi sali. In queste condizioni si rende facile l'adescamento dell'arco che può provocare la rottura degli isolatori. Questo inconveniente si verifica molto più facilmente sugli isolatori rigidi che sugli isolatori sospesi a catena, perciò per ovviarvi si è ricorso al montaggio di catene di isolatori in sostituzione dei rigidi, ma anche con questi il fenomeno pur essendo diminuito non è completamente scomparso. Di qui la necessità di studiare un tipo di isolatore che offrisse una buona garanzia alla scarica superficiale anche con depositi salini.

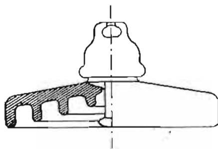


Fig. 96.

L'unico modo era quello di aumentare il percorso di scarica aumentando lo sviluppo superficiale, tenendo presente di proteggere la parte inferiore della campana dell'isolatore dall'azione del vento. È nato così l'isolatore come in figura 96.

Questo isolatore ha dato dei risultati discreti, riuscendo in molti casi ad eliminare l'inconveniente degli archi; però in casi di durata eccezionale dei venti marini o di maggior persistenza della nebbia salmastra si rivelava insufficiente allo scopo. Si studiarono quindi altri tipi di cui parliamo più sotto.

Isolatori antinebbia.

Il fatto che molti isolatori montati su linee che attraversavano zone industriali erano soggetti ad insudiciamenti che diminuivano il loro potere isolante e facilitavano l'adescamento dell'arco, ha portato a studiare dei tipi speciali che potessero dare una buona garanzia per la continuità del servizio elettrico in queste zone.

Le linee più incriminate erano quelle che seguivano la costa del mare e che erano soggette a depositi marini, come abbiamo già visto, e quelle che attraversavano zone di stabilimenti dove erano soggette all'effetto dei fumi e delle polveri.

A questo si aggiunga che mentre con la pioggia l'isolatore veniva ad essere lavato almeno nella parte superiore, in caso di nebbia esso veniva a trovarsi immerso in un ambiente umido conduttore. Dal 1923 furono costruiti poi per la prima volta sezionatori all'aperto per tensioni molto elevate ed anche per questi nelle zone in cui l'aria è ricca di polveri e di fumi, la superficie dell'isolatore veniva a ricoprirsi di uno strato di sudiciume che determinava una notevole diminuzione della tensione di scarica nella nebbia. Questo inconveniente richiedeva una pulitura meccanica degli isolatori, il che comportava una limitazione di esercizio.

Si passò perciò allo studio di numerosi tipi di isolatori che garantissero l'esercizio elettrico per il loro ottimo comportamento sotto la pioggia, nella polvere e nella nebbia senza dover ricorrere a troppo frequenti interruzioni per la pulitura.

Per lo studio ed il progetto di isolatori che presentassero poca sensibilità all'insudiciamento servirono le ricerche sistematiche di Koppelmann, il quale eseguì delle prove sottopioggia su isolatori por-

tanti aventi inclinazioni, sporgenze e distanze varie delle campane ed ottenne i risultati seguenti, validi però solo per la pioggia:

1) Le campane devono essere poco inclinate rispetto al piano normale dell'asse dell'isolatore onde ottenere spazi d'aria atti ad isolare la maggior tensione possibile e per ridurre al minimo le parti inumìdite.

2) La distanza fra le campane deve essere circa il doppio della sporgenza delle campane stesse.

3) Il valore effettivo della tensione di scarica sotto pioggia V_p si suddivide in due parti:

a) tratti d'aria che formano ponti (Σ S);

b) parti sinuose della superficie dell'isolatore (Σ W), nei seguenti rapporti:

$$V_p = (3{,}9\ \Sigma S + 1{,}1\ \Sigma W)\ \text{in KV}.$$

Dimodochè in un isolatore pulito, sottoposto a pioggia, i tratti che possono formare ponti di scariche sopportano più del triplo della tensione sopportata dalla superficie dell'isolatore inumidita dall'acqua.

L'isolatore numero 1 in figura 97 costruito secondo i principi su esposti si è notevolmente affermato nell'esercizio in regioni dove non vi sia possibilità di deposito di notevole sudiciume.

Per proteggere l'isolatore da polvere apportata meccanicamente si provvide la superficie di un tratto sinuoso più lungo e di spazi di protezione particolari che potessero ostacolare l'accesso alla polvere.

Diversi tipi di isolatori furono studiati con campane foggiate diversamente (vedi fig. 97) non solo per isolatori portanti, ma anche per isolatori sospesi (fig. 98).

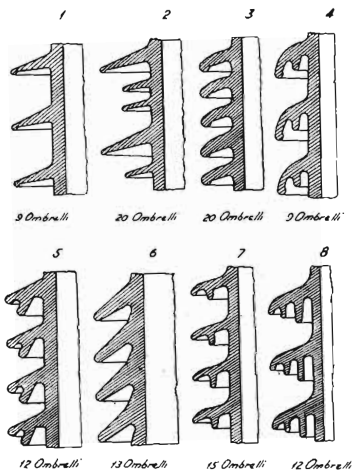


Fig. 97.
Forme degli ombrelli degli isolatori studiati.

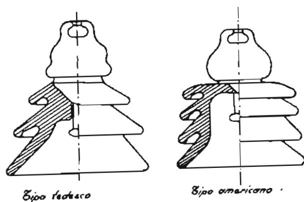


Fig. 98.

Dispositivo di prova.

Gli isolatori di cui abbiamo parlato vennero studiati in merito al loro comportamento nella nebbia e con insudiciamento da Estorff e Weber. Per le prove usarono una camera di insudiciamento di m. 2,8 × 3,3 di base e di m. 4 di altezza, con la disposizione degli apparecchi come in figura 99.

Gli isolatori portanti in prova venivano appoggiati su una tavola rivestita di lamiera, le catene di isolatori sospesi venivano ancorate al soffitto. La polvere veniva soffiata nella parte superiore della camera. L'umidità dell'aria voluta veniva prodotta introducendo vapore ed era controllata con un igrometro. Il raffreddamento degli isolatori in prova veniva ottenuto in due armadi refrigeranti mediante anidride carbonica solida. Un ventilatore appeso al soffitto permetteva l'agitazione e la miscelazione dell'aria, del vapore e della polvere. Mediante un ventilatore installato lateralmente si poteva produrre del vento laterale; attraverso finestre di vetro gli isolatori si potevano osservare dal di fuori.

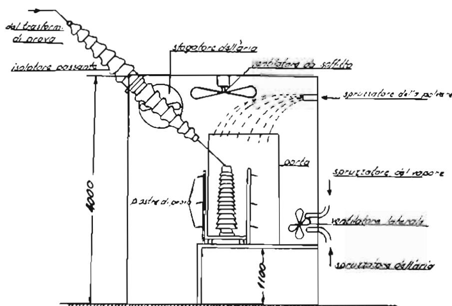
Per l'aspirazione dell'aria dalla camera verso l'esterno serviva un ventilatore applicato alla parete esterna. La corrente ad alto potenziale veniva introdotta mediante un isolatore passante sporgente obliquamente dall'alto della camera.

Nei processi di insudiciamento esigenti un certo tempo fu adoperato un trasformatore da 15 kVA per porre gli isolatori sotto tensione; la tensione di scarica veniva però prodotta con un trasformatore da 800 kVA.

Esecuzione delle prove.

Quanto maggiore è la percentuale delle parti solubili in acqua della polvere e quanto più facilmente si disciolgono, tanto maggiore è la sua influenza sulla tensione di scarica degli isolatori per esterno. Per le prove che riportiamo furono usate polveri di lignite.

Allo stato secco la polvere ed i depositi di cenere sulla superficie dell'isolatore di porcellana non hanno influenza degna di nota



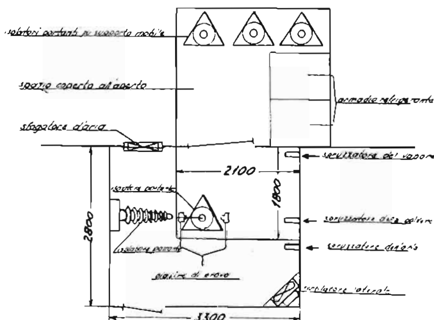


Fig. 99.
Disposizione della camera di annebbiamento e di insudiciamento.

sulla tensione di scarica. Quando i sali contenuti nel sudiciume e gli altri componenti conduttori si disciolgono in seguito a nebbia o pioggia, vi è pericolo per gli isolatori e questo aumenta quanto maggiore è il numero dei componenti solubili in acqua contenuti nello strato di sudiciume.

Quale campione poi per il pericolo di sudiciume è stata considerata la conducibilità di una soluzione al 5 % in peso nell'acqua distillata dopo 24 ore di riposo a 24 °C. La conducibilità delle ceneri di lignite usate nelle prove era, in soluzione al 5 %, di 4800 Siemens/cm.

Prima della misurazione della tensione della scarica nella nebbia gli isolatori furono sottoposti ad un trattamento preliminare comprendente tre operazioni: raffreddamento, annebbiamento ed insudiciamento.

Dopo un sufficiente raffreddamento gli isolatori vennero portati nella camera di insudiciamento nella quale con una insufflazione di vapore era stata prodotta una umidità relativa del 100 % ad una temperatura di 20 ÷ 30 °C. Sulla superficie si verificò una uniforme condensazione di acqua e l'annebbiamento venne continuato fino all'inizio della formazione di gocce sugli orli delle campane. Ad annebbiamento ultimato vennero soffiate ceneri volanti nella parte superiore della camera mentre contemporaneamente l'isolatore veniva sottoposto ad una tensione di 60 kV. In ogni prova vennero soffiati nella camera 250 grammi di polvere e ceneri di lignite per un intervallo di 16 minuti a ventilatori fermi. In un secondo tempo venne introdotta nella camera a pressione atmosferica della polvere fine e della polvere grossolana in modo che la polvere fine rimase in sospensione nella camera il più a lungo possibile e potè depositarsi anche per effetto elettrico. Gli isolatori furono sottoposti per mezz'ora ad una tensione di 60 kV, e per 10 minuti a 100 kV.

Per il controllo dei singoli insudiciamenti si collocarono a varie altezze ed inclinazioni in prossimità degli isolatori su di una traversa in legno alcune piastre ceramiche aventi ciascuna una superficie di 100 × 100 mm., mentre la quantità di polvere depositata su tali piastre veniva pesata alla fine di ciascun insudiciamento, dopo

essiccazione. Le quantità di polvere pesate nei singoli insudiciamenti differirono tra loro fino al 20 %. Le quantità di polvere depositate corrisposero circa al coseno dell'angolo d'inclinazione delle piastre sull'orizzontale. Questo processo di insudiciamento viene denominato insudiciamento semplice; nell'insudiciamento ripetuto, l'isolatore veniva più volte raffreddato e dopo l'evaporazione dello strato di umidità, annebbiato ed insudiciato nello stesso modo.

Dopo ogni insudiciamento venne determinata la tensione di scarica. La tensione veniva inserita ed aumentata fino alla scarica.

La tensione di scarica veniva misurata ripetutamente ad intervalli di tempo uguali di mezzo minuto o di un minuto.

Misurazione della tensione di scarica. Curve V.

Mentre la tensione di scarica può essere ripetutamente misurata per l'isolatore asciutto e si può trovare un valore medio per tutte le misure fatte, nell'isolatore insudiciato ed immerso nella nebbia il valore delle tensioni di scarica misurate, varia. Infatti il primo valore è elevato, i seguenti scendono fino ad un minimo per poi risalire fino al valore di scarica a secco. Segnando la tensione di scarica in esatta successione di tempo, dipendente dal numero di scariche eseguite si ha una curva con un minimo: la cosidetta *curva V*.

Le figure 100, 101, 102, mostrano le curve *V* per gli isolatori portanti N. 1 e N. 5 e per una catena di sospensione di 6 elementi del tipo Ha 761.

Spiegazione della curva V.

Mentre per l'isolatore asciutto la tensione di scarica presenta il valore più alto tanto a superficie pulita che insudiciata, per l'isolatore insudiciato ed immerso nella nebbia le cose stanno diversamente.

La distribuzione della tensione lungo la superficie dell'isolatore è influenzata dalla corrente che va a terra attraverso lo strato umido di sudiciume e la rende uniforme. Per questo il valore iniziale della

tensione di scarica è alto. Aumentando ripetutamente la tensione fino alla scarica si produce un'essiccazione in taluni punti a causa del riscaldamento progressivo dello strato umido di sudiciume. I punti in cui questo strato è più sottile si essiccano per primi. Vengono

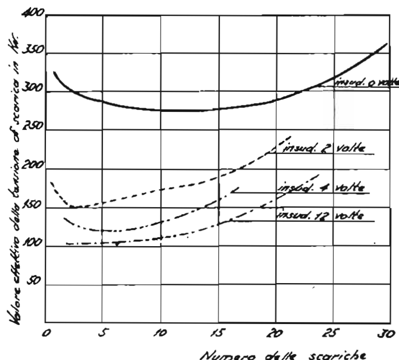


Fig. 100.
Curve *V* dell'isolatore N. 1 per 120 kV dopo ripetuto insudiciamento.

così a formarsi delle zone secche che si allargano mentre quelle umide si restringono. Mediante l'accoppiamento in serie di punti asciutti ad alta resistenza e di punti umidi a bassa resistenza si viene ad avere una distribuzione di tensione molto irregolare lungo la superficie dell'isolatore. Questa variazione della distribuzione di tensione è la causa della diminuzione iniziale ed il rinnovato aumento della tensione di scarica nelle curve *V*. Questo è stato confermato da prove su modello.

Se il minimo della curva *V* di isolatori inumiditi di nebbia ed insudiciati si trova al disotto della loro tensione d'esercizio gli isolatori percorrono la loro curva *V* anche alla tensione d'esercizio e dopo qualche tempo scaricano. Diminuendo però la tensione d'esercizio applicata fin sotto al minimo della curva *V*, l'isolatore, dopo aver passato il minimo, percorre il ramo ascendente della curva e si ottiene di nuovo una tensione di scarica superiore alla normale.

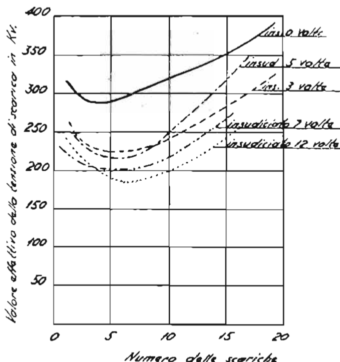


Fig. 101.
Curve *V* dell'isolatore N. 5 per 110 kV dopo ripetuto insudiciamento.

Curve decrescenti.

Nella figura 103 sono riportati i punti minimi delle curve *V* per ogni isolatore in funzione del numero degli insudiciamenti artificiali.

Le curve che si ottengono sono delle curve decrescenti diverse per le varie forme di isolatori studiati.

Dal diagramma si vede che è meno sensibile la diminuzione della tensione di scarica per quegli isolatori che hanno una disposi-

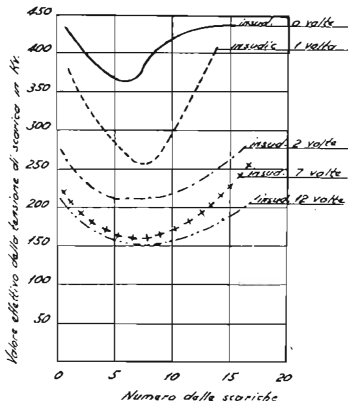
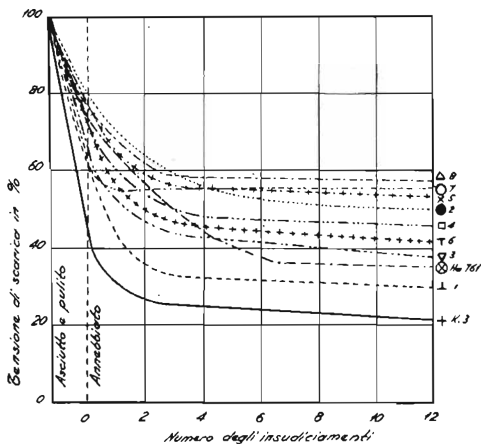


Fig. 102.
Curve *V* di una catena di sospesi da 6 elementi Ha 761 dopo ripetuto insudiciamento.

zione sistematica di camere di protezione, come gli isolatori N.5, 7, 8, e nei confronti di una catena normale di sospensione il tipo Ha 761.

Gli isolatori di questo tipo che si distinguono per scarsa sensibilità all'insudiciamento ed alla nebbia furono chiamati « *isolatori antinebbia.* »



⊥ Poggianta N. 1
● " " 2
▽ " " 3
□ " " 4
× " " 5
T " " 6
○ Poggianta N. 7
△ " " 8
⊗ Catena di sospensione a 6 elementi Ho 761.
+ Catena di sospensione a 6 elementi K. 3

Fig. 103.
Curve decrescenti di isolatori insudiciati artificialmente.

La superiorità di questi isolatori diventa ancor più evidente se essi sono esposti al vento laterale o se vengono montati con asse orizzontale. Infatti in caso di caduta di polvere viene impedito, mediante le camere di protezione, l'insudiciamento meccanico di tutta la superficie.

Per poter studiare le differenze esistenti tra l'insudiciamento naturale e quello artificiale, parte degli isolatori sottoposti a studio

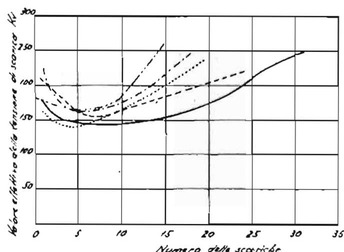


Fig. 104.
Curve *V* di isolatori portanti a 120 kV aventi rispettivamente le forme 2-3-4-5-6 dopo insudiciamento in esercizio di 6 settimane.

furono montati all'aperto in una zona industriale con atmosfera ricca di ceneri di lignite ed in vicinanza di una fabbrica di carburo di calcio dalla quale giungeva sugli isolatori una miscela di polvere finissima di coke e di calce che formava sulla superficie di questi un cemento saldamente aderente.

Dopo sei settimane di insudiciamento naturale furono posti nella camera di annebbiamento e vennero determinate le curve *V* su questi isolatori (fig. 104).

Orbene, i risultati ottenuti furono pressochè uguali a quelli ottenuti con insudiciamento artificiale.

Vantaggi dell'isolatore antinebbia.

Confrontando ad esempio le curve dell'isolatore N. 1 con campane normali, per tensione d'esercizio di 120 kV. e dell'isolatore

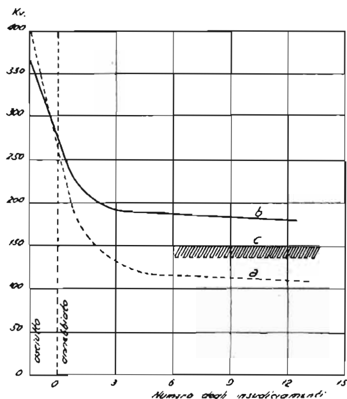


Fig. 105.

Confronto di un isolatore per nebbia della serie 110 con un isolatore normale della serie 120 aventi insudiciamento vario.

a) Curva decrescente dell'isolatore per nebbia per 110 kV
b) Curva decrescente dell'isolatore normale per 120 kV
c) Tensione critica per condutture aerea per 110 kV

N. 5 antinebbia per tensione di 110 kV., (figura 105) vediamo che allo stato asciutto il primo ha una tensione di scarica di circa 400 kV. contro una tensione di scarica di 360 kV. del secondo; però già con l'immersione nella nebbia allo stato pulito questi due isolatori pre-

sentano una uguale tensione di scarica ridotta a 260 kV. La differenza si accentua dopo parecchi insudiciamenti e mentre per il primo decresce fino al valore finale di 107 kV. (curva *a*), per il tipo antinebbia si riduce solo fino a 175 kV. (curva *b*). Nel diagramma stesso è riportata la cosidetta tensione critica (linea *c*) fino alla quale la tensione di scarica può diminuire senza che si verifichino scariche nell'impianto. Questo valore deve trovarsi almeno al disopra della tensione d'esercizio dal 27 al 36 %.

Mentre per il primo isolatore già dopo il terzo insudiciamento la tensione di scarica si riduce al disotto di questa tensione e perciò dovrebbe essere pulito, per il tipo antinebbia anche dopo 12 insudiciamenti la tensione di scarica resta con notevole sicurezza al disopra di questa tensione critica. Dimodochè con l'attrezzatura di un impianto con isolatori antinebbia l'esercizio viene ad avere un esito più vantaggioso anche di quello che si avrebbe con l'impiego di isolatori normali per tensioni superiori e non si richiede una pulizia che dopo uno spazio di tempo notevolmente più lungo.

CAPITOLO XI

ISOLATORI PORTANTI PER SOTTOSTAZIONI ALL'APERTO

Per il trasporto di energia elettrica a distanza, se si vuole evitare l'impiego di una sezione troppo grande per il conduttore e nello stesso tempo avere un buon rendimento della trasmissione, si devono impiegare tensioni elevate.

Da qui la necessità di sottostazioni di trasformazione all'arrivo delle linee ad alta tensione e poichè l'ingombro è rilevante, per le elevate tensioni usate, lo sviluppo di queste sottostazioni all'aperto.

Si è andata perciò sviluppando una costruzione di isolatori adatti allo scopo, poichè questi isolatori oltre alle elevate tensioni che devono sopportare anche sottopioggia, sono soggetti a rilevanti sforzi di flessione e di torsione, specialmente per i sezionatori.

L'arrivo alle forme ed ai tipi attualmente usati è avvenuto attraverso stadii graduali.

Un confronto interessante è riportato qui di seguito.

1) *Colonna di isolatori sospesi a cappa e perno rigidamente collegati.* — In un primo tempo si usarono isolatori del tipo sospeso, montati però con parti metalliche speciali per ottenere l'irrigidimento della colonna (fig. 106).

La cappa ed il perno avevano delle orecchie che venivano fissate rispettivamente all'elemento antecedente e conseguente per mezzo di bulloni.

Con questo sistema non si ottennero però buoni risultati alla flessione ed alla torsione anche se si raggiunse l'irrigidimento della colonna col montaggio dei perni con cemento.

2) *Colonna di isolatori a doppia testa rigidamente collegati.* — Un altro passo avanti è stato fatto con l'impiego di colonne formate di isolatori a doppia testa a nucleo pieno « Motor », coi quali si potè ottenere un facile e rigido collegamento con l'unione delle due cappe per mezzo di bulloni. (fig. 107).

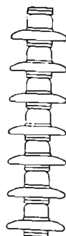


Fig. 106.



Fig. 107.

Dal punto di vista elettrico il comportamento è ottimo perchè tale tipo di isolatore è imperforabile avendo il tronco a sezione piena ed inoltre presenta un'ottima protezione contro la pioggia sia con entrambe le campane in porcellana, sia con una di porcellana ed una di metallo.

Dal punto di vista meccanico il sistema è debole poichè lo sforzo di flessione e di torsione viene ad essere sopportato dal tronco di porcellana che ha una sezione abbastanza ridotta (max. 100 mm. di diametro.)

3) *Colonna di isolatori rigidi sovrapposti.* — Un terzo tipo di colonna è stato ottenuto sovrapponendo degli isolatori rigidi in più pezzi uniti con cemento, sulla testa dei quali è stata montata una

cappa atta ad essere collegata con la base del perno dell'isolatore che viene posto superiormente (fig. 108).

Meccanicamente una colonna così formata ha un buon comportamento. Il punto debole è il perno che offre poca resistenza alla flessione.



Fig. 108.



Fig. 109.

Dal punto di vista termico la configurazione irregolare delle campane porta ad un comportamento svantaggioso. Questo tipo di colonna è ancora oggi impiegato.

4) *Colonna di isolatori portanti di forma conica.* — Un altro tipo di colonna è quello derivato dai tipi conici o parabolici per cabine chiuse. Essa consiste in tre colonnine a profilo conico, sovrapposte ed unite per mezzo di flangie imbullonate. (fig. 109).

Questa colonna presenta un'ottima resistenza meccanica alla flessione ed alla torsione; ha però un cattivo comportamento elettrico

sottopioggia ed è inoltre difficile creare una protezione efficiente per la pioggia data la sua forma che si presta ad essere bagnata completamente dalla pioggia che scorre lungo la superficie dell'isolatore.

5) *Colonna di isolatori portanti cilindrici.* — Dalla colonna conica è sorto un altro tipo più razionale ed atto allo scopo. Mantenendo il diametro inferiore e munendo il tronco di campane di protezione per la pioggia si sono costruiti dei colonnini di forma cilindrica ben rispondenti ai requisiti richiesti (fig. 110).

Con una colonna di questo tipo si ha una elevata resistenza meccanica alla trazione, alla flessione ed alla torsione, unitamente

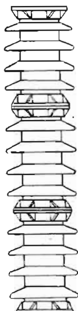


Fig. 110.

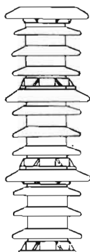


Fig. 111

ad un buon comportamento elettrico. Gli elementi che formano la colonna possono essere a due, a tre, oppure a quattro campane e le colonne si possono costruire in due diametri diversi in modo da poter supplire a tutte le esigenze sia dal punto di vista elettrico che meccanico.

6) *Colonna di isolatori portanti con ombrelli metallici di pro-*

tezione. — La fig. 111 mostra un perfezionamento apportato alla colonna sopra descritta. Infatti la colonna è stata fornita di ombrelli metallici per la protezione dalla pioggia e poichè questi mantengono asciutta una notevole superficie, danno la possibilità di raccorciare l'altezza della colonna ottenendo uguali valori per la scarica sottopioggia.

Con l'impiego di ombrelli metallici si migliora circa del 20 % la caratteristica sottopioggia. Gli ombrelli influenzano inoltre favorevolmente la capacità degli isolatori e fanno apparire molto più tardi sulle loro superfici le scariche parziali.

Con la diminuzione dell'altezza della colonna si ha poi un miglioramento meccanico oppure per gli stessi carichi si può arrivare ad una diminuzione dei diametri.

Nella tabella seguente riassumiamo un confronto, dovuto ad Altmann, tra le caratteristiche di una colonna per 150 kV. d'esercizio formata coi vari tipi di isolatori che abbiamo preso in esame.

TABELLA XII.

Caratteristiche di una colonna di isolatori per 150 KV d'esercizio formata con vari tipi di isolatori

Caratteristiche		Tipi di colonna					
		1	2	3	4	5	6
Numero degli elementi		7	4	3	3	3	3
Altezza	mm	1200	1300	1200	1650	1600	1300
Arco a secco . . .	KV	470	420	440	500	500	400
Arco sottopioggia . .	»	325	320	300	300	380	360
Tensione di perforazione	»	7 × 130	—	3 × 250	3 × 300	3 × 300	3 × 300
Carico di rottura a traz.	Kg	5 ÷ 6000	8000	5000	5000	7 ÷ 8000	7 ÷ 8000
Carico di rottura a torс.	Kgm	150	350	300	500	1000	1000
Carico di rottura a fless.	»	250	500	550	800	800	800

Dalla tabella risalta subito come i tipi di colonna 5 e 6 presentano delle caratteristiche superiori nei confronti degli altri tipi di colonne, specialmente per ciò che riguarda i carichi meccanici e l'arco sottopioggia.

CAPITOLO XII

ISOLATORI PASSANTI

L'importanza degli isolatori passanti è andata crescendo con l'aumentare delle tensioni delle linee e per conseguenza delle dimensioni dei passanti necessari per i grandi trasformatori ed interruttori in olio.

Diversi sono i requisiti richiesti per questi tipi di isolatori a seconda dei diversi impianti a bassa, media ed alta tensione.

Nei primi l'isolatore deve soddisfare ad esigenze prevalentemente meccaniche; nei secondi vanno tenute presenti le più elementari qualità elettriche dell'isolante ed infine per impianti ad alta tensione si devono sfruttare tutte le qualità elettriche dell'isolante valutando le sollecitazioni dielettriche risultanti dalla distribuzione del campo elettrico.

Le linee di forza considerate come le traccie di superfici equipotenziali, mettono in evidenza la ripartizione del potenziale nell'interno e lungo la superficie esterna dell'isolatore. La forma e le dimensioni di questo devono essere tali da consentire una buona ripartizione del potenziale ed, a parità di altre condizioni, una diminuzione delle sollecitazioni dielettriche.

Consideriamo il caso più semplice schematicamente rappresentato nella fig. 112 e riferiamoci alla teoria degli isolanti in serie esposta nella Prima Parte:

Un conduttore *L* (elettrodo interno) isolato da un tubo di porcellana *P* attraversa una superficie conduttrice *F* (recipiente metallico). Questo recipiente costituisce l'elettrodo esterno e come nel caso degli isolatori portanti bisogna supporre che la tensione totale della linea esista tra *L* ed *F*.

Tracciando le linee di forza, si vede che la sollecitazione elettrica della porcellana è massima nei dintorni dell'elettrodo esterno *F*; le linee di forza più lontane subiscono al loro passaggio nella porcellana una rifrazione, quindi in nessuna parte la sollecitazione è più grande che nei dintorni del coperchio *F*.

Nelle vecchie costruzioni dei passanti ci si contentava di aumentare lo spessore della porcellana, ma a causa delle difficoltà già esposte per la fabbricazione dei grandi spessori di porcellana, si era poi ricorso all'unione di due tubi concentrici.

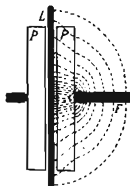


Fig. 112.

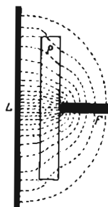


Fig. 113.

Il calcolo relativo allo sforzo elettrico in due isolanti messi in serie ha mostrato che si poteva aumentare notevolmente la rigidità dielettrica dei passanti aumentando lo strato d'aria interposto tra il conduttore e la porcellana e ciò non solo per la diminuzione delle linee di forza che ne risulta, ma specialmente per la diminuzione dello sforzo elettrico nella porcellana dovuta alla sua messa in serie con uno strato d'aria. (fig. 113)

Con questo sistema la perforazione viene ad avere luogo solo a circa il doppio della tensione normale, pur portando lo spessore della porcellana a circa metà.

Lo scintillio nell'aria tra conduttore e porcellana che precede la scarica non può dare alcun inconveniente, poichè la scintilla non può scoccare che quando la tensione è abbastanza elevata per creare nella

porcellana la ionizzazione necessaria alla perforazione. Si scelgono inoltre dimensioni e proporzioni tali da non aver alcun scintillio alla tensione d'impiego.

Caratteristiche degli isolatori passanti.

Le principali qualità richieste ad un isolatore passante sono le qualità elettriche dell'isolante di cui è formato.

I migliori isolanti atti allo scopo sono i dielettrici solidi con perdite limitate e poco variabili con l'aumentare della temperatura perchè posseggono una rigidità dielettrica elevata.

Elementi importanti caratteristici degli isolatori passanti sono:

1) la tensione limite

2) la tensione di passaggio.

Tensione limite. — È la tensione massima che l'isolatore può sopportare senza che la sua temperatura superi il valore massimo ammesso.

Tensione di passaggio. — È la tensione che separa il campo di stabilità da quello di labilità nell'equilibrio termico del dielettrico.

La tensione di passaggio è messa in evidenza dall'andamento delle curve che esprimono le perdite in funzione del tempo.

Essa, come pure la tensione limite, dipende:

1) dalla proprietà del materiale;

2) dalle perdite dielettriche;

3) dalla dipendenza delle perdite dielettriche dalla temperatura;

4) dalla conducibilità termica del materiale;

non dipende dalle dimensioni del passante.

Per una determinata disposizione la tensione di passaggio V_x è una costante dell'isolante che si può esprimere matematicamente in funzione di:

P_t = perdite specifiche alla temperatura t della flangia;

β = coefficiente che definisce l'incremento delle perdite in funzione della temperatura;

$$(p_t = p_{40}\, e^{\beta\,(t-40)} \text{ per } t = 80 \div 100\ ^\circ\mathrm{C})$$

λ = conducibilità termica del materiale;

K = coefficiente in funzione del rapporto fra il diametro del conduttore e quello della flangia.

$$(\text{per } d/D = 0{,}1 \div 0{,}3\ ,\ K = 0{,}92 \div 0{,}81)$$

mediante la formula

$$V_k = 450\, K \sqrt{\frac{\lambda}{\beta\, p_t}}$$

I risultati sperimentali confermano che questa formula consente di ottenere valori molto prossimi a quelli reali.

Isolatori passanti a condensatore.

La porcellana si è rivelata un ottimo materiale per la costruzione di isolatori passanti, ma naturalmente, a seconda delle esigenze, l'isolatore passante di porcellana deve essere integrato con l'aggiunta di altri dielettrici solidi e fluidi per ottenere una miglior distribuzione degli sforzi elettrici nei punti più sollecitati e nello stesso tempo minor ingombro, specialmente per isolatori passanti per alta tensione.

La possibilità di ottenere tensioni di scarica assai elevate è stata realizzata con la costruzione *a condensatore*, la quale comporta la suddivisione dell'isolatore ad alta tensione in un certo numero di passanti a bassa tensione collegati in serie. È possibile calcolare per questi passanti la distribuzione della tensione e ripartire la medesima tra i vari condensatori in modo da mantenere le sollecitazioni ai bordi entro determinati limiti.

È da notarsi che una ripartizione radiale uniforme della tensione peggiora, in misura inammissibile, la ripartizione longitudinale e che, al contrario, una ripartizione longitudinale uniforme è compatibile con una buona ripartizione radiale.

La fig. 114 mostra alcuni tipi di passanti che risultano dalla combinazione di vari materiali a costante dielettrica diversa; i loro

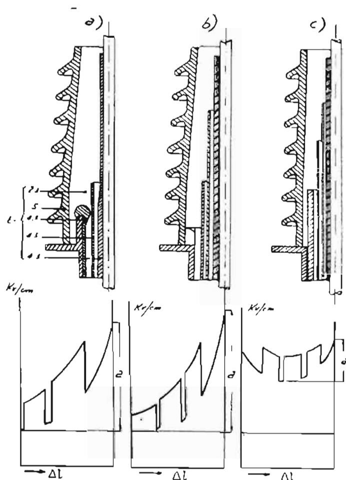


Fig. 114.
Passanti a riempimento d'olio.

elettrodi sono circondati da un dielettrico fluido che consente una facile eliminazione del calore generato dalle perdite.

In basso, nella stessa figura, in corrispondenza a ciascun passante, è rappresentata in un diagramma la ripartizione delle solleci-

tazioni in senso radiale, a partire dal collare arrivando fino al conduttore centrale.

La posizione *a*) mostra un passante a sollecitazione ideale che per ovvie ragioni costruttive non è realizzabile praticamente; la posizione *b*) indica un passante di comune costruzione. Esso consta di un isolatore passante di porcellana con interposti, tra porcellana e conduttore, dei setti di carta bachelizzata con o senza l'interposizione di armature metalliche.

La posizione *c*) mostra l'isolatore passante tipo Micafil a condensatore con riempimento d'olio.

Una utilizzazione razionale degli isolanti è consentita da una buona ripartizione del potenziale, e questa consente inoltre, a parità di tensione di prova, una accentuata diminuzione del peso dei passanti stessi.

Prove sugli isolatori passanti.

Per le prove di tensione a cui devono essere sottoposti i passanti ci si deve attenere alle basi fornite dall'esperienza poichè non esistono norme ben definite. Così è opportuno, tanto a secco quanto sotto pioggia, sottoporre i passanti ad una tensione di prova pari a $3{,}5 \div 2{,}3$ volte la tensione normale, per cinque minuti. Agli effetti dell'aumento di temperatura i passanti che devono stare in servizio in ambiente a temperatura elevata, devono venir sottoposti ad una prova di durata con tensione uguale ad $1{,}1 \div 1{,}3$ volte la tensione nominale. Ne deriva inoltre la buona norma di sottoporre i passanti a prove di sbalzi di temperatura col far subir loro i cicli termici. La scelta degli isolatori passanti va fatta oculatamente e le esigenze dell'utilizzazione rappresentano un fattore importantissimo per la scelta del passante adatto.

Un ottimo studio in proposito è stato fatto da H. Wirth.

I passanti per interruttori in olio, per esempio, devono resistere alle sollecitazioni meccaniche che si verificano all'atto dell'interruzione dei corti circuiti ed inoltre devono avere limitato ingombro, quindi la scelta dovrà essere guidata da questi criteri.

I passanti per trasformatori hanno in genere la parte inferiore di dimensioni molto ridotte e generalmente a tenuta e per la uniforme distribuzione delle sollecitazioni elettriche devono essere costruiti a condensatore e per l'eliminazione del calore delle perdite a riempimento d'olio.

Altro criterio importante di scelta è la tensione di prova in base al tipo di passante; ma in generale gli esercenti impianti elettrici si orientano verso i passanti a condensatore e a quelli a riempimento d'olio, sia per il miglior rendimento, sia per le dimensioni d'ingombro.

CAPITOLO XIII

LINEE ELETTRICHE AD ALTA TENSIONE

Lo sviluppo delle linee elettriche di trasmissione di energia elettrica è grandissimo e poichè queste linee sono soggette a gravi perturbazioni di servizio dovuti ad inconvenienti di diverso tipo è necessario studiare le cause degli inconvenienti che possono verificarsi sulle linee e provvedere ad un miglioramento nelle condizioni di esercizio basandosi sull'aumento dell'isolamento delle linee stesse, diminuendo così le cause delle perturbazioni, piuttosto che non cercare di limitarne gli effetti una volta che si siano verificate. Tanto più che i sistemi di protezione oltre ad essere costosi non garantiscono in modo assoluto contro le perturbazioni del servizio.

H. Jousse e R. Vignon hanno fatto degli studi in questo senso classificando le cause degli inconvenenti e studiandole poi particolarmente allo scopo di indicarne i relativi rimedi.

Analisi delle cause dei guasti e delle interruzioni di servizio.

1) Guasti dovuti ad un aumento momentaneo o permanente della tensione di linea:

A) Sovratensioni di origine interna (manovre di interruttori, corto circuiti). Queste perturbazioni non sono preoccupanti poichè il coefficiente di sovratensione non supera mai il valore 3 in rapporto al valore di cresta della tensione d'esercizio. Le statistiche d'esercizio stabilite in diversi paesi permettono di concludere che nelle reti a tensione superiore a 50 kV. le sole perturbazioni pericolose sono quelle di origine atmosferica.

B) Sovratensioni di origine esterna.

Le più temibili sono:

a) Colpi di fulmine indiretti;

b) Colpi di fulmine diretti.

È stato constatato che la maggior percentuale dei guasti (dal 50 al 90 % secondo la tensione di linea) sono dovuti a fulminazioni.

Per quanto riguarda i *colpi di fulmine indiretti* le recenti esperienze del Norinder hanno mostrato che le sovratensioni che ne conseguono, nella maggioranza dei casi (75 %), hanno un'ampiezza compresa tra il 25 ed il 100 % delle tensioni d'esercizio; non danno quindi luogo ad inconvenienti per linee superiori ai 100 kV.

I colpi di fulmine diretti sono invece la causa più frequente dei guasti (arco della catena di isolatori). I dati di diversi sperimentatori permettono di ritenere che le sovratensioni dovute alle scariche dirette possono arrivare normalmente a 3000 ÷ 5000 kV. ed eccezionalmente a 15000 ÷ 20000 kV.; la corrente a terra sarebbe compresa tra 45000 e 50000 A.

Nel progettare l'isolamento delle linee basterà perciò tener conto della possibilità che la linea resista alle fulminazioni dirette. Bisogna però tener presente le circostanze che agiscono nel senso di ridurre il valore delle sovratensioni come la fune di guardia (poichè il fulmine colpisce questa a preferenza dei fili di energia) l'effetto corona (il quale riduce rapidamente la sovratensione con l'aumentare della distanza dal punto colpito) e gli scaricatori (che hanno tuttavia un raggio d'azione modesto).

Nel caso delle sovratensioni dei conduttori verso terra una parte dell'energia afferente a questa sovratensione è dissipata dalla corrente di fuga superficiale degli isolatori; essa è in dipendenza dello stato della superficie degli isolatori e delle condizioni atmosferiche e poichè per linee ben costruite questa conduttanza deve essere piccola, l'energia che può essere dissipata per questa via è bassa.

L'effetto corona invece permette di estinguere in modo rapido le sovratensioni e tale azione è tanto più energica quanto più forte è la tensione iniziale.

La potenza dissipata per effetto corona è data dalla formula

$$p = Kf(E - E_0)^2$$

essa cresce cioè in proporzione alla frequenza ed al quadrato del valore della sovratensione.

Se si tien conto di tutte le cause che contribuiscono a smorzare le sovratensioni si trova che l'attenuazione può essere rappresentata dalla formula empirica

$$A = K E^2$$

dove $K = 0{,}0001$ ed E è l'ampiezza iniziale in kV.

Questa formula non tiene però conto della forma d'onda; le onde a fronte ripido e quelle dovute ad oscillazioni smorzate sono assorbite più rapidamente di quelle piatte o poco smorzate che sono capaci di propagarsi molto lontano dall'origine.

Calcolo di una linea aerea tenendo conto delle sovratensioni. — Un metodo semplificato per calcolare il numero di elementi della catena di isolatori necessari per ottenere un buon grado di sicurezza fissato ad es. in 0,5 scariche anno per 100 Km. di linea, è basato sull'impiego dei grafici.

1) Stabilito il grado di sicurezza e noto il livello isoceraunico (numero medio di temporali all'anno) della regione interessata dalla linea, con un primo abaco (costruito in base a rivelazioni statistiche) si trova il livello di isolamento in kV. da adottare per la linea (fig. 115).

2) Noto questo e la lunghezza della campata media, un secondo abaco (fig. 116) dà il numero di isolatori necessario in corrispondenza della resistenza delle prese di terra e note le caratteristiche (tensione d'arco, diametro e spessore) del tipo di isolatore che si vuole adottare.

3) Due altri grafici permettono di stabilire rispettivamente la distanza media tra il conduttore e la fune di guardia (in mezzeria della campata) in funzione del livello d'isolamento scelto (fig. 117) e la distanza minima tra conduttore e sostegno in funzione del numero di isolatori della catena (fig. 118).

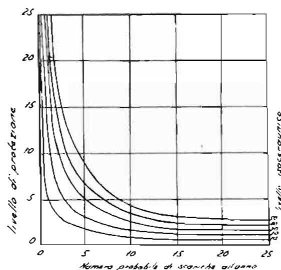


Fig. 115.
Curve del livello di protezione in funzione del numero di scariche all'anno ogni 100 Km. di linea per alcuni valori del livello isoceraunico

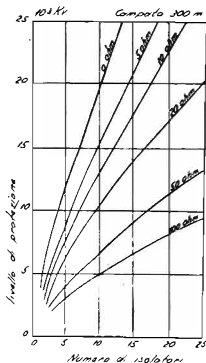


Fig. 116.
Abaco che dà il numero di isolatori in funzione delle prese di terra e del livello d'isolamento della linea per una campata di 300 m.

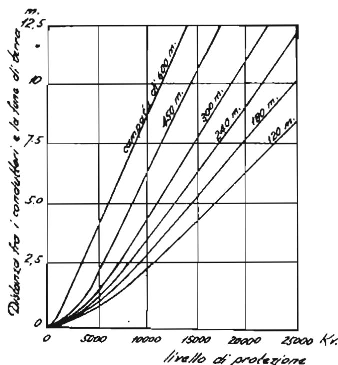


Fig. 117.
Curve che dànno la distanza minima tra il filo di terra ed i conduttori in mezzeria della campata in funzione del livello di protezione.

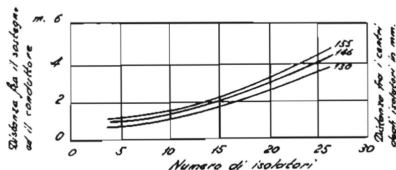


Fig. 118.
Curve che dànno la distanza minima tra conduttore e sostegno in funzione del numero di isolatori della catena.

2) Guasti dovuti ad una diminuzione delle proprietà isolanti della catena di isolatori.

La diminuzione di isolamento può essere dovuta alle seguenti cause:

a) *Isolatori difettosi.* L'eliminazione di questo difetto richiede un servizio adeguato di ispezione e di manutenzione.

b) *Pioggia.* Bisogna distinguere varie specie di pioggia le quali hanno però tutte per effetto di ridurre la tensione d'arco degli isolatori.

La tabella seguente mostra la

Tabella XIII.

Diminuzione dell'isolamento in funzione della pioggia su catene verticali.

Caratteristiche della pioggia	Riduzione approssim. della tens. d'arco a secco in %
Pioggia artificiale secondo le Norme tecniche	$70 \div 63$
Pioggia su isolatori già dilavati da pioggie precedenti:	
Pioggia normale	$63 \div 55$
Pioggia che arriva ad inumidire tutto l'isolatore	$50 \div 45$
Pioggia su isolatori dopo un lungo periodo senza pioggia:	
Pioggia normale	$63 \div 50$
Pioggia che arriva ad inumidire tutto l'isolatore	$46 \div 39$

Per le catene in posizione inclinata (amarraggi) le condizioni peggiorano; questo giustifica la pratica di rinforzare l'isolamento delle catene d'amarraggio con l'aggiunta di qualche elemento.

c) *Rugiada, condensazioni e nebbie.* Abbiamo ampliamente trattato più sopra questo argomento, considerandone gli effetti specialmente quando gli isolatori sono ricoperti di pulviscolo o di depositi salini; limitiamoci quindi a riportare in una tabella i dati raccolti in base ad esperienze compiute da diversi Autori.

TABELLA XIV.

Valori percentuali della tensione di scarica per isolatori a sospensione normale.

Stato dell'isolatore	Condizioni	Riduzione della tensione d'arco a secco in %
Isolatore pulito	a secco	100
	sottopioggia	60 ÷ 70
	coperto di rugiada . .	60 ÷ 80
	sotto nebbia di vapori	50 ÷ 60
Isolatore con depositi	a secco	90 ÷ 95
	sottopioggia	50 ÷ 60
	coperto di rugiada . .	30 ÷ 40
	sotto nebbia di vapori	40 ÷ 45
Isolatore con depositi salini	a secco (umidità 65 %)	95
	a secco (umidità 79 %)	45
	sottopioggia	40 ÷ 50
	coperto di rugiada . .	25 ÷ 40
	sotto nebbia di vapori	20 ÷ 30

Come si vede dalla tabella la pioggia comporta una riduzione notevole della tensione di scarica però, poichè essa ha anche il benefico effetto di lavare la superficie degli isolatori, tale riduzione è minore di quella che si osserva allorchè si produca una condensazione di umidità e cioè con forti nebbie, nevischio misto a pioggia e rugiada.

Il meccanismo fisico del fenomeno della variazione nel valore della tensione di scarica si può spiegare nel modo seguente:

Sugli isolatori puliti, o meglio ricoperti di un quantitativo piccolo di granelli di polvere, l'umidità atmosferica produce solo una diminuzione della mobilità degli ioni e conseguentemente un aumento della tensione di scarica.

Per valori elevati dell'umidità invece i granelli di sporcizia funzionano da centri di condensazione e la superficie degli isolatori si copre di una pellicola liquida continua. Questa provoca sempre un aumento della corrente superficiale di dispersione e quindi una alterazione della distribuzione di potenziale ed una riduzione della rigidità superficiale.

Allora si verificano anche sotto la tensione di esercizio delle scariche parziali e si può arrivare anche alla scarica totale.

Sembra che la scarica totale in una catena di isolatori tende a verificarsi quando i salti della corrente di dispersione superino il valore di circa 10 mA per elemento.

Rimedi relativi.

I rimedi da adottare per le cause di guasto considerate sono:

1) ispezioni frequenti alle linee per eliminare gli elementi difettosi;

2) pulizia periodica degli isolatori nelle zone dove la quantità e la qualità delle polveri che inquinano l'atmosfera lo rendono necessario;

3) aumento del grado di isolamento della linea;

4) installazione in luogo di isolatori normali, di elementi di tipo e forma opportunamente studiati allo scopo di ridurre la possibilità di depositi e di offrire al massimo grado la tendenza al lavaggio delle superfici da parte della pioggia (isolatori antideposito), oppure altri isolatori capaci di ridurre gli effetti di condensazione dell'umidità atmosferica (isolatori antinebbia).

Non è però possibile stabilire una forma od un tipo di isolatore che assicuri la risoluzione generale del problema, poichè ognuno dei tipi di isolatori sopra menzionati è atto a contrastare le particolari condizioni nocive per cui è stato costruito ma nelle altre si comporta ad un dipresso come un isolatore normale.

Criteri per il progetto di una linea.

Tenendo conto delle possibili cause di guasti passate in rassegna, gli Autori succitati sviluppano un metodo di progettazione che è interessante riferire.

Il loro punto di vista è che il coefficiente di sicurezza della linea deve essere scelto il medesimo per tutto il percorso, perciò il livello di isolamento deve essere calcolato in relazione alle condizioni più sfavorevoli, anche se queste non si verifichino che assai raramente.

Anzitutto il tracciato della linea verrà diviso in diversi tronchi

lungo ciascuno dei quali si possono ritenere costanti le caratteristiche climatiche, topografiche, industriali ecc. Ogni tronco sarà esaminato da ciascuno dei seguenti punti di vista:

1) Rischio di fulminazione;

2) Valore probabile della resistenza delle prese di terra;

3) Quantità e qualità dei depositi che possono formarsi sugli isolatori;

4) Pericolo di condensazioni, nebbie ecc.

Per ciascun tronco si calcolerà anzitutto il numero degli isolatori necessari per resistere agli effetti del fulmine col metodo già indicato in precedenza, si calcolerà poi, come è indicato in seguito, il numero degli isolatori necessario per resistere alle condizioni atmosferiche più sfavorevoli (condensazioni e depositi).

Serve allo scopo la seguente tabella.

TABELLA XV.

Valori della resistività dell'acqua di condensazione sugli isolatori sporchi, a seconda delle condizioni di installazione della linea.

Condizioni di installazione	Resistività dell'acqua di condensazione sugli isolatori sporchi Ohm · cm
Linee in aperta campagna lontano dai centri industriali	1200
Linee in aperta campagna vicino a regioni industriali di media importanza	700
Linee alla periferia di regioni industriali	500
Linee attraversanti ferrovie a vapore	400
Linee attraversanti regioni fortemente industriali	400
Linee attraversanti zone particolarmente polverose o con pulviscoli acidi	250

In base ad esperienze è stato possibile costruire un abaco nel quale in funzione della resistività (stabilita in base alla tabella precedente) si può dedurre la tensione di scarica delle catene di isolatori a dato numero di elementi (fig. 119).

Questo diagramma è stato costruito per un dato tipo di isolatore, però mediante l'impiego di opportuni coefficienti di correzione può essere utilizzato anche per altri tipi di maggior diffusione.

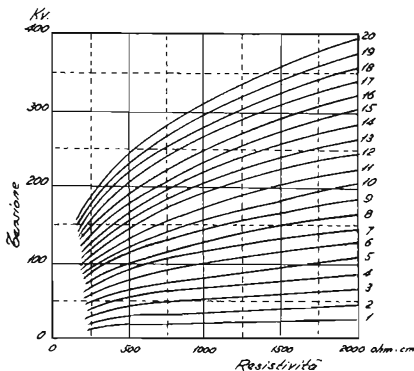


Fig. 119.
Abaco che dà la tensione d'arco in funzione della resistività

Per stabilire in definitiva il numero degli elementi è necessario riferirsi alla tensione d'arco Tc ottenuta moltiplicando la tensione d'esercizio della linea per un coefficiente di sicurezza K.

Tale coefficiente in base a dati statistici ha potuto essere determinato in funzione del grado di sicurezza della linea (numero di incidenti ogni 100 Km. all'anno).

Il valore $K = 2{,}5$ consente già una notevole sicurezza, come mostra la fig. 120.

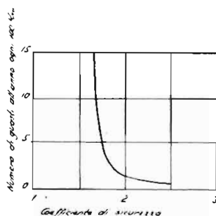


Fig. 120.
Curva che dà il numero di guasti all'anno ogni 100 Km. in funzione del coefficiente di sicurezza.

La tabella seguente raccoglie i risultati ottenuti per alcuni casi particolari scegliendo $K = 2{,}5$ e valendosi dell'abaco succitato.

TABELLA XVI.
Numero di elementi della catena in funzione del coefficiente di sicurezza della linea (1).

Resistività supposta dell'acqua di condensaz. Ohm · cm	Condizioni di installazione	Numero di elementi per $K = 2{,}5$		
		KV 220	KV 150	KV 120
1200	Linee in aperta campagna (lontano da zone industriali)	19	13	10
		17	11	9
700	Linee in aperta campagna (in vicinanza di regioni industriali di media importanza)	21	14	11
		18	12	10

La determinazione del numero di elementi si può dunque fare abbastanza speditamente.

(1) I valori della prima riga sono per catene di isolatori con elementi normali ($\phi = 255$ mm; $h = 130$ mm); quelli della seconda riga con elementi di tipo rinforzato ($\phi = 258$ mm; $h = 155$ mm).

Quando le condizioni climatiche e topografiche locali lo richiedessero sarà conveniente scegliere un K un po' maggiore il che darà luogo ad un numero maggiore di elementi della catena.

Stabilito così il numero di elementi atti a resistere agli effetti della condensazione, lo si confronterà con quello stabilito in base al valore della sovratensione e si adotterà naturalmente il maggiore dei due valori trovati.

Il metodo suesposto presenta una innovazione degna di considerazione per il suo carattere pratico sperimentale ed è consigliabile non solo per progetto di nuove linee, specialmente se a tensione più elevata di quelle finora adottate, ma anche per la modifica di linee già esistenti che non abbiano dato buoni risultati.

PARTE TERZA

COLLAUDO DEGLI ISOLATORI

CAPITOLO XIV

PROVE DI COLLAUDO SUGLI ISOLATORI

Il collaudo è l'ultima ed importante operazione che devono subire gli isolatori prima di essere definitivamente accettati e di iniziare la loro vita in linea. Esso si potrebbe chiamare l'esame di abilitazione dell'isolatore. Le prove cui deve essere assoggettato sono di due tipi, cioè:

a) prove di lotto;

b) prove di tipo.

Le prove di lotto sono delle prove di selezione e vanno eseguite su tutti gli isolatori, mentre le prove di tipo o di fabbricazione vanno eseguite solo su una percentuale di isolatori presentati al collaudo e servono per vedere se l'isolatore risponde ai requisiti di garanzia per esso assunti dal fabbricante.

Diverso è il collaudo dei vari tipi di isolatori e noi tratteremo dei tipi principali; però bisogna fare una netta distinzione fra gli isolatori per bassa tensione e gli altri tipi.

Collaudo degli isolatori telefonici.

Si distinguono due prove: prove di lotto e prove di tipo.

La prima va fatta su tutti gli isolatori e consiste nella prova di forchettatura in vasca. Gli isolatori vengono messi in vasche rivestite di piombo e devono stare immersi per almeno 12 ore capovolti in acqua acidulata con acido solforico a 5 Bé e pure tra una campana e l'altra e nel foro viene messa acqua acidulata. Il bordo degli isolatori che sporge dal bagno deve esser lavato e lasciato asciugare. L'umidità e la polvere contrastano fortemente l'esito della prova.

La forchetta a tre denti della forma come in figura 121 è collegata con un galvanometro di sensibilità 10^{-6} A. per ogni divisione di scala e con una batteria di pile che devono fornire almeno una tensione di 200 V., oppure con un raddrizzatore di corrente per la stessa tensione.



Fig. 121

Nella prova di forchettatura si prova l'isolamento tra l'interno del foro filettato e l'esterno dell'isolatore, tra l'interno e l'intercapedine tra le due campane e tra quest'ultima e l'esterno (fig. 122). Gli isolatori che il galvanometro accusa di cattivo isolamento devono essere lavati, asciugati e sottoposti nuovamente alla prova, se risultassero di nuovo difettosi vanno scartati.

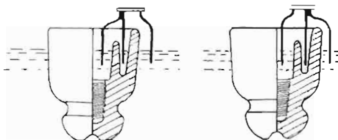


Fig. 122.

La seconda va fatta su l'1 per mille degli isolatori presentati a collaudo, con galvanometro più sensibile e con mezzi più appropriati per determinare, in condizioni analoghe alle precedenti, la resistenza di isolamento. Tale resistenza misurata nelle tre posizioni su indicate non deve risultare minore di 10000 megaohms, alla temperatura di 15 °C. Se un decimo dei pezzi così sperimentati non soddisfa a quest'ultima condizione, si deve rifare la prova sul 2 per mille dell'intera

partita e qualora un decimo del nuovo quantitativo provato non soddisfi, l'intero lotto può essere rifiutato.

La prova al galvanometro sensibile differisce dalla precedente solo per la sensibilità degli strumenti. Il circuito è composto da una sorgente di corrente continua a 200 V., da uno shunt, da un galvanometro

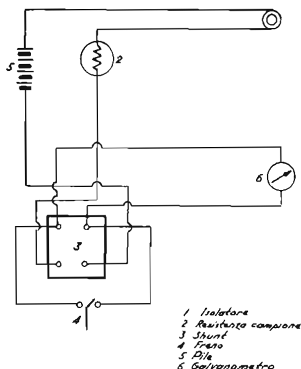


Fig. 123.
Schema del circuito per prove al galvanometro sensibile.

sensibile, dall'isolatore, da una resistenza campione e da una morsettiera; su una scala graduata si legge la deviazione dell'ago dello strumento rinviata da uno specchio (fig. 123).

Prima di iniziare la prova bisogna trovare la costante dello strumento ad isolatore escluso, chiudendo cioè il circuito con una sbarra; questo perchè è necessario rapportare la prova alla temperatura ambiente. Per far ciò si mette l'indicatore dello shunt sulla tacca 1000

per avere i megaohms e si legge sulla scala la deviazione, si moltiplica questa lettura per la resistenza campione e si ha la costante dello strumento.

Per eseguire la prova si trova lo zero del galvanometro e poi si inserisce l'isolatore nel circuito e si legge sulla scala la nuova deviazione; dividendo la costante del circuito per il valore di questa deviazione si ottiene la resistenza di isolamento dell'isolatore in prova, in megaohms.

Bisogna evitare anche le minime scosse poichè la sensibilità dello strumento ne risente e risente pure dell'umidità dell'ambiente, perciò è bene, se il locale dove si eseguiscono le prove non è molto vasto, sospendere le prove dopo circa un quarto d'ora e cambiare l'aria altri menti i risultati sarebbero falsati.

Riportiamo nella figura 124 lo schema di un raddrizzatore di corrente elevatore di tensione, ad ossido di rame.

Collaudo degli isolatori per media ed alta tensione.

Varie sono le caratteristiche meccaniche ed elettriche richieste per i diversi tipi di isolatori a seconda della loro forma e del loro impiego.

Abbiamo già fatto più sopra delle distinzioni in categorie, perciò esaminiamo come avviene il collaudo di queste categorie raggruppando però gli isolatori in questione in tre classi e cioè:

1) Isolatori rigidi;

2) Isolatori a sospensione;

3) Isolatori portanti.

Il collaudo di questi isolatori è governato da norme ben definite che ne stabiliscono le modalità e le prove a cui devono essere sottoposti.

Le prove si suddividono in:

a) Prove di tipo;

b) Prove di verifica della fabbricazione;

c) Prove di selezione.

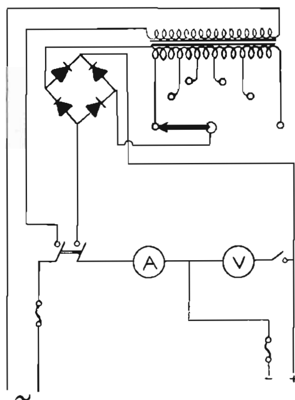


Fig. 124.
Schema di raddrizzatore di corrente elevatore di tensione.

Noi prenderemo in esame tutte queste prove per le tre classi sopra elencate.

Per l'intelligenza del testo crediamo opportuno riportare dalle Norme alcune definizioni.

Definizioni.

Scarica disruptiva in aria (o arco superficiale). — È quella che si produce attraverso l'aria, sotto forma di scintilla rumorosa, di arco o di un insieme di scintille e di archi e che seguendo completamente o parzialmente la superficie di porcellana, collega fra loro gli elettrodi tra i quali normalmente esiste la tensione d'esercizio.

Perforazione. — È una rottura localizzata del materiale isolante conseguente ad una scarica attraverso di esso. Lo staccarsi di un frammento all'orlo di una campana per il calore di un arco superficiale non va considerato come perforazione.

Tensione di prova di un minuto a frequenza industriale. — È la tensione a frequenza industriale che l'isolatore o l'elemento di catena può sopportare a secco o sottopioggia. Per le parti separate di isolatori rigidi composti di più campane, la tensione di prova delle singole campane è la tensione di prova di ogni campana le cui parti destinate ad essere messe in contatto col materiale di connessione all'atto del montaggio siano metallizzate od immerse in liquido conduttore.

Tensione critica a frequenza industriale a secco o sottopioggia. — È il valore minimo di cinque determinazioni consecutive delle tensioni di scarica dell'isolatore o dell'elemento della catena nelle condizioni previste.

Carico critico. — È lo sforzo meccanico che produce lesioni all'isolatore tali da permettere il passaggio della scarica elettrica nella prova elettromeccanica.

Carico di rottura completa. — È lo sforzo meccanico che produce il distacco delle parti metalliche o la rottura totale dell'isolatore.

Tensione di perforazione. — È la tensione che produce la perforazione dell'isolatore.

Tensioni e carichi prescritti. — Sono le tensioni o i carichi fissati tra venditore ed acquirente in relazione ai dati da verificarsi durante le prove. Le tensioni di prova e di scarica prescritte sono riferite alle condizioni atmosferiche normali.

Carico massimo d'esercizio. — È lo sforzo meccanico massimo al quale risulta sollecitato l'isolatore nelle condizioni più gravose di vento, di neve o di ghiaccio e di temperatura, supposte dal costruttore dell'impianto.

Coefficiente di sicurezza elettromeccanica. — È il rapporto tra il carico critico degli isolatori completi montati come in esercizio ed il carico massimo d'esercizio.

Coefficiente di sicurezza meccanica. — È il rapporto tra il carico di rottura completa degli isolatori completi montati come in esercizio ed il carico massimo d'esercizio.

Condizioni atmosferiche normali. — Sono caratterizzate da temperatura di 20 °C, pressione di 760 mm. di mercurio ed umidità assoluta di 11 grammi di vapore d'acqua per mc. d'aria (11 mm. di colonna di mercurio, equivalente a 63 % di umidità relativa.)

Caratteristiche tecniche di un isolatore. — Le caratteristiche elettriche e meccaniche che definiscono un isolatore completo od un suo elemento sono le seguenti:

— tensione di scarica 50 % ad impulso;

— tensione di prova di un minuto a frequenza industriale a secco e sottopioggia;

— carico critico;

— carico di rottura completa.

Non sono caratteristiche dell'isolatore nè il carico massimo d'esercizio per cui esso viene impiegato (carico che può variare, per lo stesso isolatore da località a località a seconda delle condizioni e dei criteri d'impiego) nè la tensione di perforazione in olio.

Classificazione delle prove.

Le prove del primo e secondo gruppo (prova di tipo e della verifica della fabbricazione) hanno lo scopo di verificare le caratteristiche del tipo di isolatore in prova nonchè le dimensioni e le caratteristiche fisiche degli isolatori dei vari lotti della fornitura.

Le prove del terzo gruppo (prove di selezione) hanno lo scopo di eliminare i pezzi difettosi della fornitura.

I. - *Prove di tipo.* — Le prove di tipo sono le seguenti:

a) prova di scarica 50 % a impulso a secco;

b) prova di tensione di un minuto a frequenza industriale e determinazione della tensione critica a secco.

c) prova di tensione di un minuto a frequenza industriale e determinazione della tensione critica sottopioggia.

La prova *c*) è da eseguirsi solo su isolatori per esterno.

II. - *Prove di verifica della fabbricazione.* — Sono le seguenti:

a) verifica delle dimensioni e dei pesi;

b) prova di resistenza alle variazioni rapide di temperatura.

c) prove meccaniche ed elettromeccaniche;

d) prove di perforazione in olio;

e) prova di porosità;

f) prova di zincatura.

Il numero di isolatori destinati a queste prove è dell'otto per mille di ciascuna fornata.

Le prove *a*) e *b*) si devono fare su tutti i pezzi prelevati. La prova *c*) si deve fare su una metà dei pezzi scelti per le prove, la *d*) sull'altra metà. La prova *e*) si deve fare su frammenti prelevati dalle prove precedenti. La *f*) si deve fare sulle montature di ferro o ghisa zincate, di tutti i pezzi prelevati per le prove precedenti.

III. - *Prove di selezione.* — Le prove di selezione sono:

a) selezione a vista preliminare;

b) selezione elettrica preliminare a frequenza industriale;

c) selezione elettrica preliminare ad alta frequenza;

d) selezione meccanica a trazione;

e) selezione elettrica definitiva a frequenza industriale;

f) selezione a vista definitiva.

Le prove *c*) e *d*) si applicano solo agli isolatori sospesi a catena. Qualora in una delle prove precedenti la percentuale dei guasti superi il 3 % oppure nel complesso delle prove *b*) *c*) *d*) *e*) superi il 6 % il lotto viene dichiarato non conforme alle norme.

Esecuzione delle prove di collaudo.

Gli isolatori pronti per il collaudo vengono inviati alla Sala Prove. Per gli isolatori in più pezzi cementati e per i sospesi si è già

proceduto alla prima selezione elettrica in vasca sulle singole parti prima del montaggio ed inoltre per gli isolatori sospesi anche alla selezione meccanica con uno sforzo pari alla metà del carico critico. Per le prove meccaniche sulle parti metalliche ha già provveduto il fornitore di queste.

Si procede quindi alla selezione elettrica definitiva in vasca con una tensione a frequenza industriale che non deve essere inferiore al 95 % di quella che dà luogo a scariche superficiali così frequenti da disturbare la prova stessa.

Per gli isolatori portanti a colonna cava la tensione di prova è data dalla formula empirica

$$kV = 25 + 2S$$

dove S è lo spessore della porcellana espresso in mm.

In base alle percentuali stabilite dalle Norme si scelgono alcuni isolatori del lotto in collaudo e su di essi si procede alla verifica delle dimensioni e del peso. Le tolleranze ammesse sono del 3 % sul peso; del 5 % sulle dimensioni inferiori a 50 mm. e del 3 % su quelle superiori a 50 mm.

Con contratto speciale possono anche essere richieste tolleranze inferiori a quelle stabilite dalle Norme.

Prova di resistenza alle variazioni rapide di temperatura.

Gli isolatori vengono immersi alternativamente in acqua calda e fredda. Quelli a colonna e quelli di tipo rigido a perno in più pezzi cementati, devono poter sopportare 10 cicli completi (20 immersioni) senza screpolarsi, con sbalzo di temperatura di 60 °C; quelli di linea in un sol pezzo, rigidi o sospesi, devono poter sopportare senza screpolarsi 25 cicli completi (50 immersioni) con sbalzo di temperatura di 70 °C.

La durata di ogni immersione è data dalla formula

$$T = 8 + 0{,}15\,S$$

T = tempo in minuti primi;
S = spessore della porcellana in mm.

Ogni volta che gli isolatori sono estratti dal bagno vengono battuti con un mazzuolo di legno per constatarne l'integrità.

Dopo i cicli termici vengono riassoggettati ad una prova elettrica in vasca con le stesse modalità precedentemente viste, per assicurarsi del loro buono stato.

Prove elettriche d'arco a secco e sottopioggia.

A questo scopo i tipi rigidi vengono montati su un sostegno metallico messo a terra e sulla gola dell'isolatore viene applicata la tensione; i tipi a sospensione vengono sospesi per la cappa ad una sbarra su cui è applicata la tensione ed il perno viene messo a terra oppure viene messa tensione sulle due parti metalliche dell'isolatore. (figura 125).

La prova si eseguisce nel modo seguente:

Si applica una tensione pari alla metà di quella di prova prescritta V_p e la si aumenta uniformemente in modo da raggiungere in non meno di 10 secondi la tensione V_p. Questa viene mantenuta per un minuto e poi aumentata fino alla scarica superficiale. La prova si ripete cinque volte e si registrano i valori; il minimo di tali valori viene assunto come tensione critica; se però qualche valore per cause accidentali scartasse troppo dalla media, non se ne tiene conto. Il valore minimo delle cinque misure effettuate non deve essere inferiore a 1,10 V_p e quello medio a 1,15 V_p.

Per la prova d'arco sottopioggia si procede come precedentemente e per mezzo di apposito spruzzatore viene inviata sull'isolatore una pioggia con un'intensità di 3 mm. al minuto e con un'inclinazione di 45° sulla verticale e la sua temperatura non deve differire di oltre 10 °C dalla temperatura ambiente nelle vicinanze dell'isolatore. La resistività dell'acqua deve essere compresa tra 9000 ed 11000 Ω cm. ed in nessun caso deve essere minore di 4000 Ω cm.; per resistività dell'acqua diverse da 11000 Ω cm. i risultati vanno corretti valendosi di un apposito diagramma.

Se le misure vengono fatte in condizioni atmosferiche diverse

da quelle normali (vedi sopra) i risultati dovranno essere corretti con dati riportati in opportune tabelle.

Per la verifica delle tensioni critiche si deve mettere in serie con

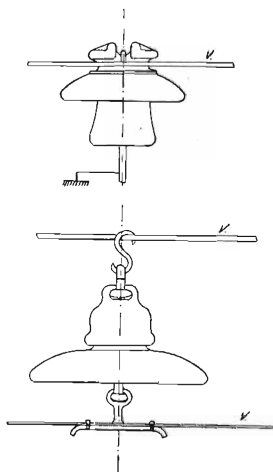


Fig. 125.

l'isolatore una resistenza non induttiva, di valore sufficiente per impedire scariche oscillatorie che altererebbero la misura, ma tale da non provocare cadute di tensione sensibili con la corrente di capacità.

Prove meccaniche.

La prova meccanica va subita dagli isolatori rigidi e dai colonnini. Gli isolatori rigidi subiscono una prova di flessione e di trazione; vengono perciò montati su un perno fissato ad una macchina

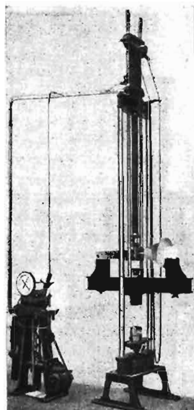


Fig. 126.
Prova di flessione su isolatore rigido.

atta allo scopo; attorno alla gola dell'isolatore viene attaccata una fune metallica oppure la gola dell'isolatore appoggia su apposita sagoma metallica e per mezzo di un motore e relative trasmissioni viene esercitato lo sforzo fino a rottura. Un manometro a glicerina regi-

stra il carico raggiunto e questo non deve essere inferiore a quello prescritto. (fig. 126)

Per la prova di trazione serve la stessa macchina. L'isolatore viene preso sotto la gola da quattro ganasce e su di esse viene esercitato

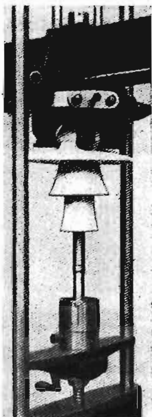


Fig. 127
Prova di trazione su isolatore rigido

lo sforzo di trazione mentre il perno è mantenuto fermo in posto. (fig. 127)

Per i colonnini tre sono le prove cui devono essere assoggettati. Per le prove di trazione e di flessione si procede nello stesso modo che per i precedenti. (fig. 128) Per la prova di torsione, l'isolatore mon-

tato di flangie viene fissato per mezzo di bulloni ad una piastra nella sua parte inferiore e sulla testa viene pure fissata per mezzo di bulloni

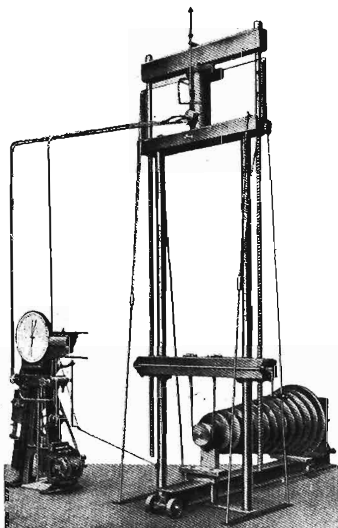


Fig. 128.
Prova di flessione su colonnino.

una traversa rigida di ferro ad un'estremità della quale viene applicato lo sforzo per mezzo di un'asta comandata da una cremagliera ed

una riduzione ad ingranaggi. Per evitare una contemporanea flessione l'isolatore è fissato ad un punto rigido per mezzo di un sistema di tiranti, nella sua parte superiore. (fig. 129)

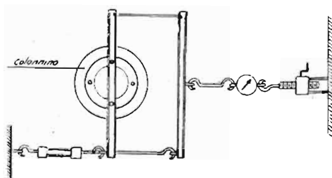


Fig. 129.
Prova di torsione su colonnino (pianta).

Tra il comando e l'isolatore è interposto un dinamometro che ne registra il carico in Kg. In tutte queste prove in cui i valori devono essere registrati in chilogrammetri, si deve moltiplicare il carico per il braccio di leva.

Prove elettromeccaniche.

Sugli isolatori a sospensione si effettua invece una prova combinata elettrica e meccanica.

L'isolatore in prova viene messo su una macchina che può essere orizzontale o verticale, in genere servono le stesse macchine viste in precedenza; la macchina viene collegata con la terra e l'isolatore viene sottoposto ad uno sforzo di trazione assiale uguale a metà del carico critico prescritto, per tre minuti e contemporaneamente viene applicata alla cappa una tensione elettrica pari al 70 % della tensione di prova di un minuto prescritta, avendo cura naturalmente di isolare anche da quest'altra parte l'isolatore dalla macchina messa a terra, con un sistema isolante interposto. (fig. 130).

Il sistema di isolamento rappresentato in figura 130 ha il vantaggio di distribuire lo sforzo sui due isolatori a cui è collegato quello

in prova, dimodochè essi possono praticamente sopportare un numero elevatissimo di prove senza danneggiarsi.

Lo sforzo di trazione viene aumentato in ragione di 100 Kg. al secondo, mantenendo costante la tensione, fino a rottura completa. Si

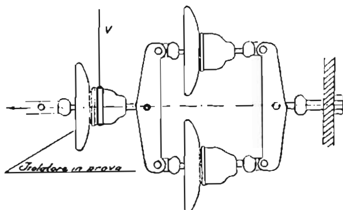


Fig. 130.
Dispositivo per prove elettromeccaniche su isolatori a sospensione.

prende nota tanto del carico critico, rivelato dalla perforazione dell'isolatore, che di quello di rottura completa. Questi valori non devono essere inferiori a quelli prescritti.

Prove di perforazione in olio.

Si applica a tutti i tipi di isolatori esclusi quelli a fusto massiccio (bastoni, motor, ecc.) A questo scopo l'isolatore in prova è immerso in un recipiente pieno d'olio. Il recipiente, isolato da terra, può essere o tutto metallico ed allora deve avere un diametro molto grande e la più breve distanza tra le pareti ed il bordo dell'isolatore deve essere almeno 1,5 volte il diametro della campana più grande dell'isolatore; oppure a fondo metallico ed a pareti di materiale isolante (bachelite ecc.)

L'isolatore viene sistemato su un sostegno metallico appoggiato sul fondo del recipiente pure metallico e sul fondo del recipiente e sulla gola dell'isolatore viene applicata la tensione a frequenza indu-

striale che viene aumentata gradualmente fino a raggiungere la perforazione. (fig. 131)

Per gli isolatori sospesi si procede nel modo seguente: l'isolatore viene sospeso per il perno ed immerso nell'olio, alla cappa viene attaccata una catenella che appoggia sul fondo del recipiente; la tensione

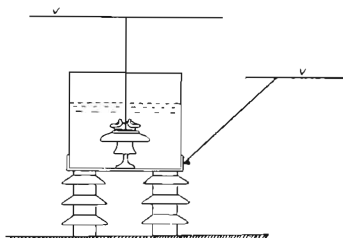


Fig. 131.
Prova di perforazione in olio su isolatore rigido.

viene applicata al perno ed al fondo del recipiente come nel caso precedente. (fig. 132)

La tensione di perforazione non deve risultare inferiore ad 1,5 volte la tensione critica a secco e ad ogni modo non deve essere inferiore alle garanzie assunte per ciascun tipo di isolatore.

Prova di porosità.

Si eseguisce su frammenti prelevati dagli isolatori rotti nelle prove precedenti. I frammenti vengono immersi in soluzione alcoolica di fucsina all'1 % in peso, sotto pressione per un numero di ore tale che il prodotto del tempo in ore per la pressione in Kg/cmq. non sia inferiore a 2400; ad ogni modo però la pressione non deve mai scendere al disotto di 70 Kg/cmq.

Dopo la prova in fucsina i frammenti estratti dal bagno vengono asciugati e scheggiati e non si deve vedere alcuna penetrazione di materia colorante al disotto della superficie.

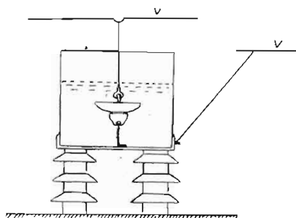


Fig. 132.
Prova di perforazione in olio su isolatore a sospensione.

Per questa prova servono apposite macchine robustissime formate di una camera dove viene messo il cestello coi frammenti e di una pompa ed apposite valvole di tenuta.

Un manometro ne registra la pressione.

Prova di zincatura.

Si eseguisce sulle parti metalliche degli isolatori montati, rotti nelle prove precedenti.

I campioni prelevati vengono puliti con benzina o con alcool quindi risciacquati ed asciugati, poi si procede alla prova per immersione in una soluzione di solfato di rame formata con 36 parti di cristalli di solfato di rame e 100 parti in peso di acqua; si neutralizza la soluzione con l'aggiunta di un eccesso di ossido ramico e sul fondo del recipiente si deve vedere un deposito di ossido. La densità della soluzione deve essere di 1,186 a 18 °C. Ogni campione deve essere sottoposto a quattro immersioni di un minuto; dopo ogni immersione i campioni devono essere lavati in acqua pura ed al termine della prova

non vi deve essere su di essi alcun deposito di rame aderente, altrimenti l'intera partita viene rifiutata.

Prove speciali.

Oltre alle prove di collaudo che abbiamo ricordato, per accordi speciali possono essere eseguite altri tipi di prove, limitatamente però agli isolatori a sospensione. Ricordiamo solo le principali:

1) Prove termo-meccaniche. — L'isolatore in prova tenuto per 10 minuti primi a 75 °C., viene immediatamente sottoposto ad uno sforzo meccanico uguale a 0,5 del carico critico. Questa prova si eseguisce su una limitatissima percentuale.

2) Prove meccaniche di lunga durata. — Si assoggetta il 10 per mille di ogni lotto ad uno sforzo di trazione corrispondente a 0,65 del carico critico, per un periodo di tempo da convenirsi che può essere di 2 ore o più.

3) Prove meccaniche con vibrazioni. — Hanno lo scopo di verificare il comportamento degli isolatori nelle condizioni in cui vengono a trovarsi in linea per le vibrazioni dei fili. Si combinano perciò le prove meccaniche di lunga durata con quelle di vibrazione mediante un dispositivo meccanico che faccia tremolare gli organi di attacco.

Il carico meccanico viene però limitato in questo caso a metà di quello critico, poichè possono entrare in giuoco effetti di risonanza tra il tremolio dei pesi e quello dell'apparecchio vibratorio.

Dopo ciascuna di queste prove gli isolatori vengono assoggettati ad una prova elettrica di verifica per constatarne l'integrità.

Attrezzatura del laboratorio per le prove.

Le Norme stabiliscono che il fabbricante deve essere attrezzato per eseguire tutte le prove in esse contemplate tranne quelle ad impulso e quelle di verifica per le tensioni critiche di catene composte di numerosi elementi; queste ultime potranno essere eseguite in un laboratorio gradito alle parti.

In genere tutte le fabbriche sono attrezzate con Sale Prove per tensioni sull'ordine di 500 kV. a frequenza industriale, ed in questi ultimi anni si sono andati sviluppando anche gli impianti per prove ad impulso.

La fig. 133 mostra una Sala Prove per prove di selezione fino a 150 kV. Essa consta di quattro vasche della capacità totale di 240 pezzi divise in due sezioni di 120 pezzi ciascuna, in modo che mentre una è in fase di prova l'altra può essere scaricata e ricaricata.

Le vasche sono rivestite di metallo e sono collegate con la terra. La tensione viene distribuita per mezzo di una rete metallica alla quale sono applicate delle catenelle che appoggiano su ciascun isolatore in prova. Sulla catenella tra la rete di distribuzione e l'isolatore è inserito un piccolo isolatore a carrucola che rompe la continuità di contatto e dà luogo ad un piccolo spazio spinterometrico. Questi piccoli spinterometri inseriti hanno lo scopo di facilitare l'individuazione degli isolatori che si perforano durante la prova, poichè la corrente che va a terra e che è costretta a passare attraverso questo straterello d'aria crea un arco luminosissimo.

L'apparecchiatura completa è composta da un trasformatore, un regolatore di tensione, un quadro di manovra con voltmetro ed amperometro ed un interruttore automatico in olio.

La fig. 134 mostra la pianta di una Sala Prove per prove di selezione e di tipo per tensioni fino a 400 kV. a frequenza industriale.

L'impianto consiste in:

1) trasformatore;
2) regolatore di tensione;
3) interruttore automatico in olio;
4) quadro di manovra con voltmetro ed amperometro;
5) secchione per la perforazione in olio;
6) apparecchio per la pioggia artificiale;
8) spinterometro a sfere;
7) macchina per prove meccaniche ed elettromeccaniche;
9) aspiratore per l'ozono;
10) spazio per gli isolatori in prova.

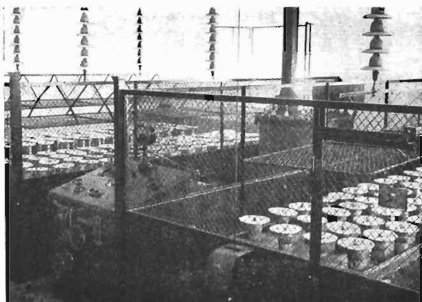


Fig. 133.
Sala Prove per prove di selezione fino a 150 kV a frequenza industriale.

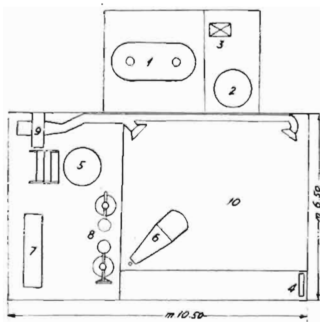


Fig. 134.
Sala Prove a frequenza industriale per tensione fino a 400 kV.

CAPITOLO XV

PROVE AD IMPULSO

Statistiche compilate nei riguardi delle interruzioni di servizio degli impianti di trasmissione di energia elettrica, hanno dimostrato che almeno il 75 % delle sospensioni di servizio avviene durante i temporali e sono perciò causate da scariche atmosferiche.

Per poter eliminare gli effetti dannosi di queste scariche si è proceduto allo studio sulle caratteristiche del fulmine, specialmente per quanto concerne la sua forma d'onda ed i suoi massimi valori di tensione e di corrente.

Accertati questi valori è stato possibile in questi ultimi tempi riprodurre artificialmente il fenomeno e sottoporre a queste sollecitazioni elevate le strutture isolanti per determinarne il loro comportamento. Lo studio delle scariche elettriche fu iniziato da alcuni decenni da numerosi studiosi, ma solo dal 1925 in poi con l'introduzione ed il successivo perfezionamento dell'oscillografo a raggi catodici si poterono ricavare elementi attendibili per la registrazione dei fenomeni naturali.

Registrazione delle scariche atmosferiche.

Negli oscillografi a raggi catodici si utilizza per la lettura la deviazione che due placche affacciate, tra cui si applica un campo elettrostatico, imprimono ad un fascio di raggi elettronici emessi, in vuoto spinto, da un catodo a cui è applicata una corrente continua, in generale, ad alta tensione.

Il fascio di raggi elettronici viene concentrato per mezzo di ap-

posite bobine, dette di concentrazione, ed è estremamente sensibile all'azione di campi elettrici e magnetici ed ha inoltre il vantaggio di impressionare direttamente una pellicola fotografica o di eccitare uno schermo fluorescente.

La sensibilità dello strumento (deviazione per volt) è maggiore quanto è minore la tensione del catodo.

Essa è espressa dalla formula

$$S = \frac{1}{2V} \frac{L}{D} A \text{ cm/volt}$$

dove

V = tensione del catodo;

L = lunghezza delle placche deviatrici;

D = distanza delle placche deviatrici;

A = distanza dal centro allo schermo o pellicola.

In questi strumenti ha importanza però anche l'intensità della traccia, poichè, trattandosi di fenomeni rapidissimi, essa limita la velocità di variazione dei fenomeni registrabili.

L'intensità della traccia è maggiore quanto maggiore è la tensione del catodo.

Con l'oscillografo è stato possibile registrare su una linea a 110 kV. nello Stato di Arkansas, un'onda ad impulso con una tensione di cresta di 5000 kV. in un tempo di 2 microsecondi, con gradiente massimo della fronte d'onda di circa 4000 kV/μ s, che diminuisce all'emivalore in circa 8 microsecondi. (fig. 133).

Oltre all'onda di tensione si è oggi in grado di misurare anche l'onda corrente di un fulmine per mezzo del *fulcronografo,* apparecchio che è stato sviluppato dai tecnici della Westinghouse. Esso utilizza il principio di determinare la corrente in base alla misura della magnetizzazione residua di barrette d'acciaio, ad alta proprietà retentiva, sottoposte all'azione magnetizzante della corrente stessa.

La parte essenziale del fulcronografo è un disco rotante di materiale amagnetico portante alla periferia, parallelamente all'asse di rotazione, una serie uniformemente distribuita di sottili lamine d'acciaio

speciale; queste laminette, durante la rotazione, vengono successivamente fatte passare fra piccole bobine percorse dalla corrente da misurare. Esse vengono pertanto soggette ad una forza magnetizzante proporzionale alla corrente istantanea attraverso le bobine.

Misurando il magnetismo residuo delle lamine è possibile costruire per punti un grafico della corrente in funzione del tempo, quando è nota la velocità di rotazione.

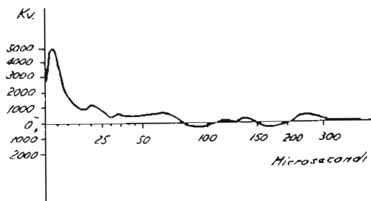


Fig. 135
Oscillogramma di un'onda di tensione di origine atmosferica registrata con oscillografo su linea a 110 kV.

Il fulcronografo è generalmente costituito da due dischi, uno dei quali ruota a forte velocità (3500 giri/min.) e serve per la determinazione della prima parte dell'onda per durate dell'ordine di 40 μ s, e l'altro a bassa velocità (60 giri/min.) per la determinazione della coda fino a durate di circa un secondo.

La fig. 136 rappresenta un fulcronigramma della corrente di un fulmine registrato sul grattacielo dell'Università di Pittsburgh da ingegneri della Westinghouse.

Si nota che la corrente ha raggiunto un valore di cresta di circa 20000 ampere con una durata di circa 20000 microsecondi.

Per mezzo di questi ed altri rilievi diretti si è potuto arrivare alla conoscenza completa del fenomeno e si è potuto stabilire che il fulmine si presenta come un fenomeno assai variabile da caso a caso sia

per ciò che riguarda la forma dell'onda, la sua durata ed i valori massimi di cresta raggiunti dalla tensione e dalla corrente, sia per il fatto che la scarica non è sempre costituita da una semplice onda, ma può presentarsi anche come il susseguirsi a brevissimi intervalli, dell'ordine di frazioni di microsecondi, di onde multiple.

Si è potuto inoltre constatare che anche nel caso di un impulso semplice, bisogna considerare questo come una sovrapposizione di tre

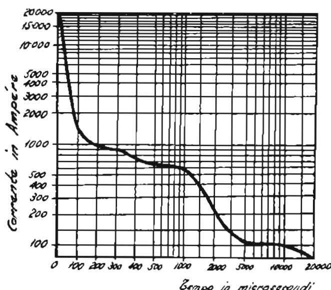


Fig. 136.
Fulcronigramma dell'onda di corrente di una scarica atmosferica diretta.

onde diverse che però possono anche non verificarsi tutte contemporaneamente, ma spesso solo due accoppiate oppure anche una sola. Esse sono:

1) un'onda di tensione di cresta elevatissima ma di brevissima durata (parecchi milioni di volts per 2 ÷ 4 microsecondi);

2) un'onda di corrente ad alta intensità e di media durata (può raggiungere anche qualche centinaio di migliaia di ampere per 100 microsecondi);

3) un'onda di corrente di valore limitato ma di durata rela-

tivamente lunga (da 500 a 5000 ampere per 1000 ÷ 100000 microsecondi).

Gli effetti di una scarica complessa sugli isolanti si verificano come segue:

a) l'onda di altissima tensione e di breve durata provoca la perforazione dell'isolante;

b) l'onda di corrente ad alta intensità e di media durata provoca la rottura e frantumazione dell'isolante;

c) l'onda di limitata corrente e di lunga durata provoca la bruciatura e la fusione dell'isolante.

Riproduzione artificiale dei fenomeni atmosferici.

Conosciuti i particolari dei complessi fenomeni atmosferici si è proceduto allo studio per realizzare la riproduzione artificiale dei fenomeni stessi.

Il fatto che la scarica di un condensatore elettrostatico presenta analogia col fenomeno di scarica atmosferica fece sì che lo studio si

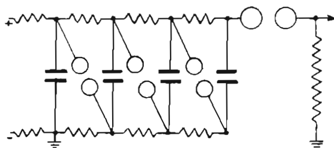


Fig. 137.
Circuito elementare di Marx.

indirizzasse verso le scariche di batterie di numerosi condensatori connessi in serie ed in parallelo e caricati con tensione raddrizzata.

Il circuito fondamentale è quello di Marx. (fig. 137)

Esso consiste in un sistema di condensatori connesso in modo da poterne effettuare la carica lenta con tutti gli elementi in parallelo per mezzo di apposite sbarre di carica a resistenza molto alta; ciascun con-

densatore è provvisto di spinterometro a sfere con una delle sfere collegate al precedente condensatore e l'altra al seguente. La tensione applicata a questi spinterometri è quella di carica dei condensatori in parallelo; se si fa scattare il primo spinterometro si stabilisce una connessione in serie dei due primi condensatori e la tensione applicata sul secondo condensatore risulta raddoppiata e procedendo nello stesso modo si riesce a triplicarla sul terzo e così via, per cui tra l'ultimo spinterometro e la terra viene ad essere applicata una tensione

$$n V_c$$

se n = numero dei condensatori,

V_c = tensione di carica in parallelo.

Il circuito di scarica si chiude attraverso una resistenza tra l'ultimo spinterometro e la terra, in parallelo alla quale sono disposti altri spazi esplosivi verso terra e dove si pongono gli isolanti da sollecitare.

Lo schema di Marx si presta per regolare le caratteristiche delle onde generate, variando i valori delle resistenze inserite tra gli spinterometri del generatore e variando pure opportunamente l'ultima resistenza in parallelo verso terra.

Si possono così ottenere onde di elevata tensione e di piccola corrente, oppure onde di corrente elevata alla tensione massima di carica di un condensatore o gruppo di condensatori, oppure anche onde di elevata tensione con contemporanea onda di elevata corrente.

Merita una particolare menzione il generatore di impulsi complessi, ideato e brevettato dall'ingegnere italiano P. Bellaschi della Società Westinghouse Electric. Esso comprende:

1) un sistema di condensatori per scariche in serie che permette di avere un'onda di elevatissima tensione e della durata da 2 a 4 microsecondi;

2) un sistema di condensatori per scarica in parallelo con caratteristiche di bassa impedenza e capace di generare onde di corrente molto intensa in un tempo di circa 10 microsecondi.

3) un sistema di condensatori per scarica in parallelo con caratteristiche di alta impedenza, provvisto di un sistema di regolazio-

ne del tempo di scarica in modo da poter generare onde di corrente di basso valore ma di lunga durata.

In altre parole con questo apparecchio è possibile una riproduzione integrale e prossima alla realtà dei fenomeni atmosferici.

Lo schema di principio di un'apparecchiatura per la generazione di impulsi è come segnato in fig. 138.

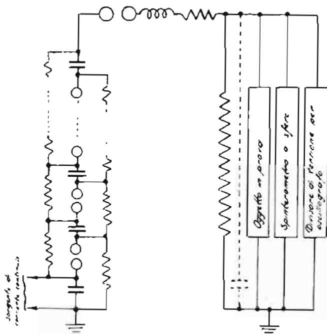


Fig. 138.
Schema di principio di un'apparecchiatura per la generazione di impulsi

Oltre al generatore di impulsi un moderno impianto deve essere corredato dalle apparecchiature di comando e di controllo, cosicchè in definitiva l'impianto viene ad essere costituito da:

a) un generatore di impulsi;

b) un pannello di comando degli impulsi;

c) un divisore di tensione a resistenza per la registrazione degli impulsi per mezzo dell'oscillografo;

d) uno spinterometro a sfere per il controllo della tensione di cresta ad impulso;

e) un oscillografo a raggi catodici per la registrazione degli impulsi;

f) un quadro di manovra.

Prove ad impulso sugli isolatori.

Le prove a frequenza industriale non possono dare alcuna indicazione sulla resistenza dell'isolamento alla sollecitazione ad impulso. La tensione a frequenza industriale che si può applicare agli isolanti è molto inferiore ai valori di sollecitazione che si possono verificare in realtà nel caso di una scarica atmosferica che colpisca la struttura isolante, ed inoltre la distribuzione del potenziale è ben diversa nel caso che la tensione venga applicata di colpo, come negli impulsi, da quella che si ha con l'applicazione di tensione a frequenza industriale gradualmente crescente.

Da qui la necessità di sottoporre gli isolanti alle prove ad impulso che permettono di studiare il loro comportamento in condizioni uguali a quelle in cui possono venire a trovarsi in realtà.

Definizioni.

Riportiamo dalle norme che regolano le prove ad impulso, alcune definizioni.

Per rendere paragonabili i risultati delle prove ad impulso le Norme raccomandano l'impiego di onde normali.

Onda normale. — L'onda normale da impiegare nelle prove ha la durata della fronte di un microsecondo e la durata fino all'emivalore di cinquanta microsecondi, tale onda viene designata con la notazione 1/50 (fig. 139).

Quando si debba applicare all'oggetto in prova una sollecitazione di durata più breve, si deve applicare un'onda del tipo 1/5 (fig. 140). È ammessa una tolleranza del 20 % sulla durata della fronte d'onda e

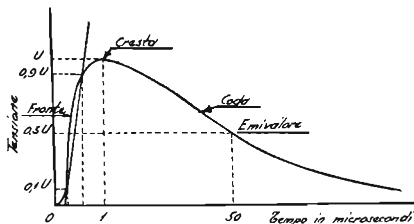


Fig. 139.
Onda ad impulso normale 1/50.

del 10 % nella durata fino all'emivalore. L'ampiezza delle eventuali componenti oscillanti non deve superare il 5 % del valore di cresta dell'onda.

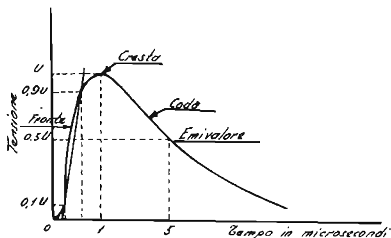


Fig. 140.
Onda ad impulso normale 1/5.

Tensione ad impulso completa. — È una tensione ad impulso che si verifica senza dar luogo a scariche o perforazioni.

Tensione ad impulso interrotta. — È un'onda ad impulso nella quale in seguito ad una scarica o ad una perforazione, la tensione cade bruscamente ad un valore più basso di quello che avrebbe avuto se la scarica o la perforazione non fosse avvenuta. (fig. 141) L'interruzione può avvenire sia sulla fronte sia sulla coda.



Fig. 141.
Onda ad impulso interrotta.

Tensione di cresta o valore di cresta. — È il valore massimo raggiunto dalla tensione ad impulso.

Fronte d'onda. — È la parte ascendente della curva che rappresenta la tensione ad impulso.

Inizio dell'onda. — È convenzionalmente il punto d'incontro con l'asse dei tempi della retta congiungente i punti le cui ordinate sono rispettivamente uguali al 10 % ed al 90 % del valore di cresta.

Durata della fronte d'onda. È convenzionalmente uguale a 1,25 volte il tempo che intercorre fra il passaggio della tensione ad impulso per il 10 % ed il 90 % del valore di cresta lungo la fronte d'onda.

Ripidità della fronte d'onda. — Per una tensione ad impulso completa è convenzionalmente l'incremento di tensione per unità di tempo corrispondente alla porzione della fronte d'onda compresa tra il 10 % ed il 90 % del valore di cresta.

Per una tensione ad impulso interrotta sulla fronte è l'incremento di tensione per unità di tempo corrispondente alla porzione della fronte compresa fra il 10 % ed il 90 % della tensione al momento della scarica.

Coda d'onda. — È la parte discendente della curva tensione tempo.

Permanenza dell'onda sopra l'emivalore. — È convenzionalmente il tempo durante il quale la tensione ad impulso si mantiene non inferiore in valore alla metà di quello di cresta.

Caratteri fondamentali di una tensione ad impulso. — Sono: la polarità, il valore di cresta ed i tempi di inizio e quello in cui l'onda raggiunge l'emivalore.

Caratteri fondamentali di un'onda ad impulso interrotta. — Sono: la polarità, la tensione di scarica o di perforazione, i tempi d'inizio e dell'emivalore della corrispondente onda d'impulso completa e la durata fino alla scarica od alla perforazione.

Tensione di scarica esterna ad impulso. — È quella che si produce sotto forma di scintilla rumorosa, o di arco, nel mezzo circostante alla struttura isolante in prova e che congiunge i terminali metallici senza dar luogo alla perforazione.

Essa dipende:

— dal tipo, dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto in prova, come pure dal tipo, dalla forma, dalle dimensioni e dalla posizione relativa degli oggetti circostanti;

— dalla forma della tensione ad impulso;

— dalla polarità della tensione ad impulso;

— dalle condizioni ambientali;

— da eventuali sorgenti di ionizzazione interessanti l'ambiente ove può avvenire la scarica.

Tensione di scarica esterna ad impulso sulla fronte d'onda. — È il valore della tensione ad impulso al momento in cui si produce la scarica esterna, quando questa avviene sulla fronte d'onda.

Tensione di scarica esterna ad impulso sulla coda d'onda. — È il valore di cresta dell'onda di tensione che dà luogo alla scarica esterna in corrispondenza della coda dell'onda.

Tensione di scarica esterna 50 % ad impulso. — È il valore di cresta della tensione ad impulso che applicata ripetutamente all'oggetto in prova dà luogo alla scarica esterna sulla coda o, al limite, sulla cresta dell'onda per circa il 50 % degli impulsi applicati.

Rapporto d'impulso per la scarica esterna a secco o sotto pioggia. — È il rapporto fra la tensione di scarica esterna 50 % ad impulso ed il valore di cresta della tensione di scarica esterna a frequenza industriale rispettivamente a secco e sottopioggia.

Durata fino alla scarica esterna ad impulso. — È convenzionalmente il tempo che intercorre fra l'inizio dell'onda e l'istante in cui questa viene interrotta dalla scarica esterna.

Ritardo alla scarica esterna ad impulso. È il tempo che intercorre fra l'istante in cui la tensione sulla fronte dell'onda raggiunge un valore uguale al valore di cresta della tensione di scarica a frequenza industriale e l'istante in cui avviene la scarica.

Caratteristica di scarica esterna ad impulso. — La caratteristica esterna ad impulso di una struttura isolante, per una tensione ad impulso avente determinati caratteri e, polarità, è rappresentata da un diagramma avente per ordinate i valori delle tensioni di scarica esterna 50 % ad impulso e per ascisse le corrispondenti durate fino alla scarica esterna. (fig. 142)

Perforazione. — È una rottura localizzata del materiale isolante costituente la struttura in prova, che si verifica per effetto di una scarica attraverso di esso. La tensione di perforazione dipende essenzialmente, oltre che dal valore massimo, anche dalla polarità della

tensione applicata nonchè dalle condizioni atmosferiche durante la prova.

La perforazione ad impulso può avvenire, secondo le circostanze lungo la fronte dell'onda, oppure lungo la coda.

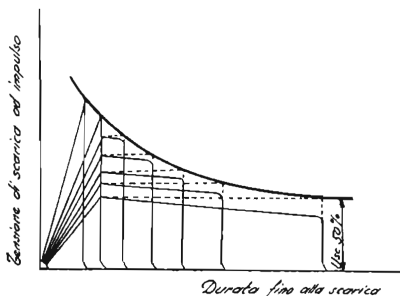


Fig. 142.
Caratteristica di scarica esterna

Tensione di perforazione ad impulso sulla fronte dell'onda. — È il valore raggiunto dalla tensione ad impulso all'atto della perforazione dell'oggetto in prova quando questa avviene in corrispondenza della fronte dell'onda.

Tensione di perforazione ad impulso sulla coda dell'onda. — È il valore di cresta dell'onda di tensione che produce la perforazione dell'oggetto in prova, quando questa avviene in corrispondenza della coda dell'onda.

Rapporto di impulso per la perforazione. — È il rapporto tra la tensione di perforazione ad impulso ed il valore di cresta della tensione di perforazione a frequenza industriale.

Durata fino alla perforazione ad impulso. — È convenzionalmente il tempo che intercorre fra l'inizio dell'onda e l'istante in cui questa viene interrotta dalla perforazione.

Ritardo alla perforazione ad impulso. — È il tempo che intercorre fra l'istante in cui la tensione sulla fronte dell'onda raggiunge un valore uguale al valore di cresta della tensione di perforazione a frequenza industriale e quello in cui si inizia la perforazione.

Le prove ad impulso che si eseguiscono sugli isolatori sono le *prove di scarica esterna* e quelle *di perforazione*.

Prove di scarica esterna.

Per le prove di scarica esterna ad impulso non è definibile un valore minimo determinato di tensione di scarica, poichè intervengono numerosi fattori che possono influire sul risultato; perciò il comportamento alla scarica esterna di una struttura isolante è definibile solo a mezzo di curve, dette *caratteristiche di scarica esterna,* relative a ciascuna polarità e a ciascun tipo d'onda impiegata. Queste curve defi-

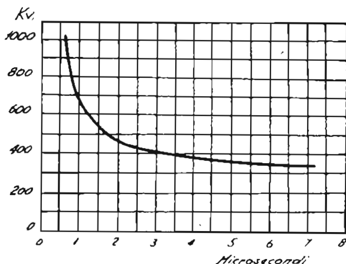


Fig. 143.
Caratteristica di scarica esterna per una catena di isolatori.

niscono in modo completo il comportamento di una struttura isolante alle sollecitazioni ad impulso.

Per ottenere queste curve conviene determinare il primo punto

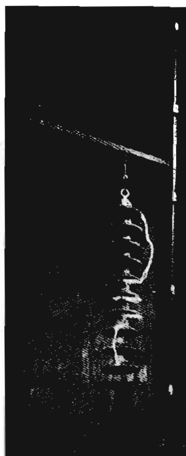


Fig. 144.
Scarica ad impulso su catena di isolatori a 10 elementi.

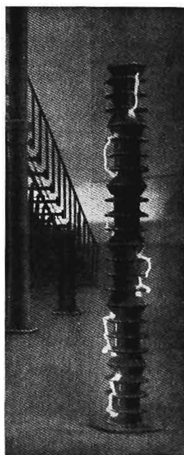


Fig. 145.
Scarica esterna ad impulso su colonna di isolatori portanti.

alla tensione di scarica 50 % (scarica sulla coda d'onda con la massima durata) per poi salire gradualmente con le tensioni di cresta fino ad ottenere scariche sulla cresta e sulla fronte dell'onda.

Le Norme C.E.I. prescrivono un numero di scariche non inferiore a tre per ciascun punto ed una variazione della tensione di cresta per gradi non maggiori del 10 %.

La fig. 143 mostra la caratteristica di scarica esterna per una catena di isolatori a sospensione.

La fig. 144 mostra una scarica ad impulso su una catena di 10 isolatori a sospensione, ottenuta applicando un'onda con valore di cresta di circa 1000 kV.

La fig. 145 mostra una scarica ad impulso su una colonna di isolatori portanti ottenuta con tensione di cresta dell'onda d'impulso di circa 1600 kV.

Prove di perforazione.

La tensione di perforazione ad impulso per un dielettrico è ben definibile e questa potrà aver luogo sulla fronte ovvero sulla coda d'onda. I valori della tensione di perforazione variano con la forma d'onda e con la polarità.

Eseguendo delle prove di perforazione ad impulso su una serie di

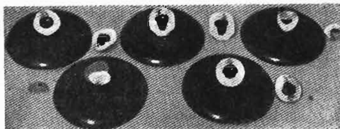


Fig. 146
Isolatori a sospensione perforati con tensione ad impulso

pezzi supposti identici si può anche qui ottenere una curva tensione-tempo che ha per ordinate le tensioni di perforazione e per ascisse le durate fino alla scarica. Queste curve si chiamano *caratteristiche di perforazione.*

Le prove di perforazione ad impulso vengono eseguite in olio con

le stesse disposizioni che abbiamo già visto per quelle a frequenza industriale, ma a differenza di quanto si riscontra nelle prove a frequenza industriale i valori della tensione di perforazione non risultano influenzati dalla rigidità dell'olio.

La perforazione ad impulso si manifesta quasi sempre con la rottura della porcellana perforata. (fig. 146)

La conoscenza delle caratteristiche di scarica esterna e di perforazione sono di fondamentale importanza per lo studio del coordinamento dell'isolamento e delle protezioni relative alle linee elettriche

CAPITOLO XVI

PROVE AD ALTA FREQUENZA

Per gli isolatori di porcellana queste prove interessano meno delle precedenti, poichè come abbiamo già detto, la porcellana è meno atta di altri materiali isolanti alle alte frequenze. Queste prove vengono perciò limitate in casi speciali solo agli isolatori a sospensione ed ai tipi di isolatori rigidi di linea di dimensioni rilevanti.

Sono prove di rigidità dielettrica che possono essere impiegate come prova selettiva su tutti gli isolatori, oppure come verifica della fabbricazione sopra una percentuale (10 a 20 %) di ogni lotto.

Le Norme prescrivono che la frequenza impiegata deve essere compresa tra 200.000 e 500.000 periodi al secondo e la potenza dell'impianto deve essere di almeno 5 kVA.

La tensione di prova deve superare del 25 % quella critica a secco degli isolatori da provare e la prova deve durare 5 minuti secondi.

Tabella IV. — *Principali proprietà dei materiali ceramici per uso elettrotecnico.*

Caratteristiche		Unità di misura	1° Gruppo	2° Gruppo	3° Gruppo	4° Gruppo	5° Gruppo
Denominazione			Porcellana dura	Steatite	Impasti titaniferi	Cordierite-Steatite	Steatite porosa
Composizione chimica			Silico-alluminosa-alcalina	Magnesiaca	Titanifera	Silico-alluminosa-magnesiaca	Silico-alluminosa-magnesiaca
Impiego			Isolatori alta e bassa tensione per frequenze industr.	Isolatori alta e bassa tensione per alte frequenze	Condensatori per alte frequenze	Apparecchi per alta temperatura ad alta frequenza	Supporti apparecchi termo-elettrici
Caratteristiche principali			Medie	Piccolo fatt. di perdita	Alta costante dielettrica	Piccola dilataz. termica	Resistenza termica
Peso specifico		gr/cmc	2,3 ÷ 2,5	2,6 ÷ 2,8	3,6 ÷ 3,9	2,2	1,6 ÷ 2,5
Resistenza alla trazione		Kg/cmq	200 ÷ 400	550 ÷ 900	300 ÷ 600	260 ÷ 360	90 ÷ 160
Resistenza alla compressione		»	4000 ÷ 5000	8500 ÷ 10000	3000 ÷ 6000	3000 ÷ 5000	500 ÷ 2000
Resistenza alla flessione		»	400 ÷ 900	1200 ÷ 1600	900 ÷ 1500	500 ÷ 850	150 ÷ 400
Modulo di elasticità		Kg/mmq	7000 ÷ 8000	9000 ÷ 11000	9000 ÷ 13000	9000	—
Durezza		Mohs	7 ÷ 8	7 ÷ 8	7 ÷ 8	7 ÷ 8	—
Coefficiente di dilatazione termica tra 20 e 100 °C		mm/m °C	$3,5 \div 5 \cdot 10^{-6}$	$7 \div 9 \cdot 10^{-6}$	$6 \div 8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \div 4,8 \cdot 10^{-6}$
Temperatura di cottura		°C	1380 ÷ 1460	1380 ÷ 1410	1320 ÷ 1435	1380 ÷ 1410	1160 ÷ 1435
Tensione di perforazione su provini		KV/mm	25 ÷ 35	20 ÷ 45	10 ÷ 20	20	—
Costante dielettrica		ε	4,5 ÷ 6,5	5,5 ÷ 6,5	40 ÷ 80	5,0 ÷ 5,5	?—
Fattore di perdita a 50 Hz		$\text{tg}\,\delta \cdot 10^4$	170 ÷ 250	10 ÷ 30	—	200	—
Fattore di perdita a 10^7 Hz		»	70 ÷ 120	70 ÷ 120	3 ÷ 15	40 ÷ 70	—
Resistività di massa in funzione della temperatura	a 20 °C	$\Omega \cdot$ cm	$> 10^{11}$	$6 \cdot 10^{8}$	—	—	—
	a 200 °C	»	$1,6 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^9$	$1,2 \div 2,5 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8 \div 2,5 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^8 \quad 2,5 \cdot 10^{11}$
	a 300 °C	»	$1,0 \cdot 10^6 \div 4,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^6$		$6,0 \cdot 10^6 \div 7,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^8 \div 2,5 \cdot 10^9$
	a 400 °C	»	$1,6 \cdot 10^5 \div 3,4 \cdot 10^6$	$7,0 \cdot 10^5$		$5,0 \cdot 10^5 \div 5,6 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^7 \quad 1,6 \cdot 10^8$
	a 500 °C	»	$3,4 \cdot 10^4 \div 4,5 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^4$		$7,6 \cdot 10^4 \div 7,6 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5 \div 1,8 \cdot 10^7$
	a 600 °C	»	$1,0 \cdot 10^4 \div 1,0 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$		$2,4 \cdot 10^4 \div 2,3 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5 \div 3,1 \cdot 10^6$

TABELLA V. — *Principali proprietà dei materiali ceramici speciali per uso elettrotecnico.*

Denominazione	Materiali con elevato tenore di magnesio, isolanti elettrici per alte frequenze			Materiali con allumina e magnesio, isolanti elettrici resistenti alle alte temperature ed alle rapide variazioni termiche		Materiali con forte tenore di titanio per costruzione di condensatori		
	Calit	Calan	Frequenta	Ardostan	Sipa	Condensa	Condensa C	Kerafar
Peso specifico . . . . gr/cmc	2,6 ÷ 2,7	2,8	2,6 ÷ 2,8	2,2	2,2	3,7	3,9	3,5
Resistenza alla compressione . Kg/cmq	9500 ÷ 10000	5000 ÷ 6000	9000 ÷ 9500	2800 ÷ 4000	3000 ÷ 5000	6000 ÷ 9000	6000 ÷ 9000	6000 ÷ 9000
Resistenza alla trazione Kg/cmq	650 ÷ 950	400 ÷ 500	550 ÷ 850	300 ÷ 360	260 ÷ 350	300 ÷ 800	300 ÷ 800	300 ÷ 800
Resistenza alla flessione Kg/cmq	1400 ÷ 1600	1600	1600	830 ÷ 850	500 ÷ 650	900 ÷ 1500	900 ÷ 1500	900 ÷ 1500
Modulo di elasticità Kg/mmq	10800	11000	11000	7000	9000	11000	13000	11000
Tensione di perforazione . KV/mm	35 ÷ 45	35 ÷ 45	27	20	6	15 ÷ 20	10	10
Coeff. di dilatazione termica mm/m°C	$7{,}8 \cdot 10^{-6}$	$8{,}6 \cdot 10^{-6}$	$6{,}2 \div 6{,}8 \cdot 10^{-6}$	$1{,}0 \div 1{,}1 \cdot 10^{-6}$	$1{,}0 \div 1{,}1 \cdot 10^{-6}$	$6 \div 7 \cdot 10^{-6}$	$7{,}3 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$
Temperatura di rammollimento °C	1440	1580	1440	1300	1400	1430	1480	—
Costante dielettrica . . .	6,5	6,6	5,6	—	—	40	80	70
Fattore di perdita . a 300 KHz	0,041	0,036	0,020	—	—	0,097	0,072	0,20
Fattore di perdita . a 1000 KHz	0,038	0,032	0,028	—	—	0,08	0,06	0,15
Fattore di perdita . a 3000 KHz	0,037	0,028	0,030	—	—	0,072	0,041	—
Fattore di perdita . a 10000 KHz	0,034	0,026	0,038	—	—	0,061	0,032	0,12
Fattore di perdita . a 50000 KHz	0,032	0,025	0,050	—	—	0,057	0,028	—
Resistività di massa:								
a 300 °C megaohms · cm	32000	—	25000	80	6	120	2500	—
a 400 °C »	16000	250000	2200	5,6	0,8	—	—	—
a 500 °C »	180	10000	200	0,8	0,1	—	—	—
a 600 °C »	32	630	41	0,23	0,024	—	—	—